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

ВЕСТНИК

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

Том 18. № 3

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

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2026

12+

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб. : ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2026. — Т. 18. — № 3. — 200 с.

ISSN 2309-5180 (print)
ISSN 2500-0551 (online)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Адрес учредителя и издателя
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7

Адрес редакции
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: journal@gumrf.ru
http://journal.gumrf.ru

ISSN 2309-5180
9 772309 518784 >

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 365

Рослякова О. В., Сичкарев В. И. Формирование методологии проектирования гидродинамического якоря в теории дрейфа плота..... 365

Кузнецов А. Л., Кириченко А. В., Ситов А. Н. Имитационное моделирование движения судов по круговым маршрутам в условиях частичной ледовой проводки 382

Козик С. В. Разработка способа контроля физической усталости моряков..... 394

Зуб И. В., Фомичев С. А., Фомичев В. А. Оценка статистических параметров и вероятностное определение объемов грузооборота морских портов, сгруппированных по бассейнам, на основе прогностических моделей 406

Матвиенко Н. Н., Акмайкин Д. А. Управляемость судна с азимутальным подруливающим устройством в ледовых условиях 424

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

Ефросимов К. А., Ольховик Е. О., Кузнецов Р. В. Современное состояние и перспективы крупнотоннажного судостроения и производства малооборотных судовых двигателей в России..... 436

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ) 452

Розов И. В. Исследование влияния направленных газодинамических колебаний на работу топливного элемента судовой энергетической установки 452

Конюков В. Л. Анализ характеристик рабочих колес встречного вращения осевой активной турбинной ступени при различных отношениях окружных скоростей 463

Санаев Н. К., Егоров В. В., Жуков В. А. Исследование теплонапряженного состояния втулки цилиндров судового малоразмерного дизеля 473

Том 18. № 3

2026

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Гл. редактор

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

Зам. гл. редактора

А. П. Нырков
д-р техн. наук, проф.

Члены редакционной коллегии:

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

О. К. Безюков,
д-р техн. наук, проф.

А. Т. Беккер,
д-р техн. наук, проф.

Н. И. Ватин,
д-р техн. наук, проф.

П. А. Гарибин,
д-р техн. наук, проф.

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

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

Подписка на журнал осуществляется онлайн на сайте «Урал-Пресс»
www.ural-press.ru/catalog/98131/8994732 (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. Макшанов,
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.

Живлюк Г. Е., Петров А. П. Экологическая безопасность судовых дизельных двигателей: ограничение выбросов оксидов азота методами селективного каталитического восстановления 487

Столяров С. П., Йе Маунг. Разработка программного комплекса BS-STIRLING 5.0 для моделирования рабочих процессов в двигателях Стирлинга 501

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ 515

Коротков В. В., Ястребов М. Ю. Энтропийный аспект оптимизационных моделей проектной надежности АСУ 515

Барышников С. О., Чертков А. А., Каск Я. Н. Нейросетевой алгоритм параметрической идентификации законов распределения данных измерений по критерию согласия Колмогорова 525

Полковникова Н. А. Разработка интеллектуального диалогового ассистента с динамическим выбором нейросетевых языковых моделей и механизмом извлечения знаний 538

CONTENTS

Volume 18. № 3

2026

OPERATION OF WATER TRANSPORT, WATERWAYS AND HYDROGRAPHY 365

Roslyakova O. V., Sichkarev V. I. Development of a design methodology for a hydrodynamic anchor in raft drift theory 365

Kuznetsov A. L., A. V. Kirichenko, Sitov A. N. Simulation modelling of vessel movement along circular routes with partial icebreaker assistance 382

Kozik S. V. Development of a method for monitoring seafarers' physical fatigue 394

Zub I. V., S. A. Fomichev, Fomichev V. A. Statistical parameter estimation and probabilistic forecasting of cargo turnover at seaports grouped by sea basin using predictive models 406

Matvienko N. N., Akmaykin D. A. Controllability of a vessel equipped with an azimuth thruster in ice conditions 424

TECHNOLOGY OF SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION..... 436

Efrosimov K. A., E. O. Olkhovik, Kuznetsov R. V. Current state and prospects of large-tonnage shipbuilding and low-speed marine diesel engine production in Russia 436

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)..... 452

Rozov I. V. Study of the influence of directed gas-dynamic oscillations on the operation of a fuel cell in a shipboard power plant 452

Konyukov V. L. Analysis of the characteristics of counter-rotating impellers of an active-type axial turbine stage at different circumferential velocity ratios 463

Sanaev N. K., V. V. Egorov, Zhukov V. A. Investigation of the Thermal-Stress State of the Cylinder Liner of a Small-Size Marine Diesel Engine 473

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

Zhivlyuk G. E., Petrov A. P. Environmental safety of marine diesel engines: reduction of nitrogen oxides emissions by selective catalytic reduction 487

Stolyarov S. P., Ye Maung. Development of the BS-STIRLING 5.0 software package for modelling operating processes in Stirling engines 501

AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND PRODUCTIONS 515

Korotkov V. V., Yastrebov M. Y. Entropy aspect of optimization models for the design reliability of automated control cystems 515

Baryshnikov S. O., Chertkov A. A., Kask Ya. N. Neural Network Algorithm for Parametric Identification of Distribution Laws for Measurement Samples Using the Kolmogorov Goodness-of-Fit Criterion 525

Polkovnikova N. A. Development of an intelligent conversational assistant with dynamic selection of neural language models and a knowledge retrieval mechanism 538

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

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-365-381 **EDN BPAWNU**

УДК: 656.61.08

ФОРМИРОВАНИЕ МЕТОДОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ЯКОРЯ В ТЕОРИИ ДРЕЙФА ПЛОТА

О. В. Рослякова, В. И. Сичкарев

ФГБОУ ВО «СГУВТ», Новосибирск, Российская Федерация

В статье разработан подход к проектированию инновационного средства снижения скорости ветрового дрейфа спасательных плотов путем использования энергии волнения, сконцентрированной в орбитальном движении плота на волновом профиле. Актуальность исследования обусловлена необходимостью снижения скорости дрейфа спасательных средств, так как это позволяет сократить зону поиска и повысить вероятность спасения людей. Цель работы – сформировать методологию проектирования гидродинамического якоря для установки параметров системы «плот – трос – гидродинамический якорь», достаточных для заданного уменьшения скорости дрейфа спасательного средства в наихудших условиях района плавания судна. Для достижения цели в процессе исследования выполнено решение нескольких взаимосвязанных задач, среди которых получение и оценка результатов исследований гидродинамических сил, действующих на гидродинамичесикий якорь; анализ эффективности гидродинамического якоря как средства противодействия дрейфу спасательного плота и формирование методов экспериментального получения параметров работы гидродинамического якоря применительно к характерным гидрометеорологическим условиям дрейфа. В работе показана связь параметров системы «плот – трос – гидродинамический якорь» и выполнен расчет скорости дрейфа плота для нескольких значений скорости ветра в диапазоне от 6 до 20 м/с. Для задач проектирования гидродинамического якоря под заданные условия дрейфа представлены действующие силы на гидродинамическом якоре в безразмерном виде с учетом аппроксимации высот волн через скорость ветра по данным современной шкалы Бофорта. В представленной модели методологии отражен комплексный подход к оценке эффективности гидродинамического якоря для снижения дрейфа плота. Использование безразмерного коэффициента и учет истинной скорости гидродинамического якоря через ее проекции продемонстрировали высокую эффективность при расчете натяжения троса в системе спасательного средства. Предложенная методология сокращает потребность в числе экспериментов. Полученные результаты исследования позволяют выявить несогласованности в смежных этапах работы гидродинамического якоря и закладывают научную основу для совершенствования конструкции гидродинамического якоря и повышения его эффективности.

Ключевые слова: скорость дрейфа плота, гидрометеорологические условия дрейфа, натяжение троса, орбитальная скорость, малый гидродинамический якорь, скорость ветра, безразмерный коэффициент.

Для цитирования:
Рослякова О. В. Формирование методологии проектирования гидродинамического якоря в теории дрейфа плота / О. В. Рослякова, В. И. Сичкарев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 3. С. 365–381. EDN BPAWNU. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-365-381.

DEVELOPMENT OF A DESIGN METHODOLOGY FOR A HYDRODYNAMIC ANCHOR IN RAFT DRIFT THEORY

O. V. Roslyakova, V. I. Sichkarev

Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russian Federation

The article develops an approach to designing an innovative means of reducing the wind-induced drift velocity of life rafts by using wave energy concentrated in the orbital motion of a raft on the wave profile.

The relevance of the study is determined by the need to reduce the drift velocity of life-saving appliances, since this makes it possible to reduce the search area and increase the probability of rescuing people. The aim of the study is to develop a methodology for designing a hydrodynamic anchor in order to determine the parameters of the "raft–cable–hydrodynamic anchor" system that are sufficient to ensure a specified reduction in the drift velocity of a life-saving appliance under the worst conditions of the vessel's navigation area. To achieve this aim, several interrelated tasks were solved in the course of the study, including obtaining and evaluating the results of studies of the hydrodynamic forces acting on the hydrodynamic anchor; analysing the effectiveness of the hydrodynamic anchor as a means of counteracting life raft drift; and developing methods for experimentally obtaining the operating parameters of the hydrodynamic anchor in relation to typical hydrometeorological drift conditions. The paper shows the relationship between the parameters of the "raft–cable–hydrodynamic anchor" system and presents a calculation of raft drift velocity for several wind speed values in the range from 6 to 20 m/s. For the purposes of designing a hydrodynamic anchor for specified drift conditions, the forces acting on the hydrodynamic anchor are presented in dimensionless form, taking into account the approximation of wave heights through wind speed according to the modern Beaufort scale. The proposed methodological model reflects an integrated approach to assessing the effectiveness of a hydrodynamic anchor in reducing raft drift. The use of a dimensionless coefficient and consideration of the true velocity of the hydrodynamic anchor through its projections demonstrated high efficiency in calculating cable tension in the life-saving appliance system. The proposed methodology reduces the required number of experiments. The results obtained make it possible to identify inconsistencies between related stages of hydrodynamic anchor operation and provide a scientific basis for improving the design of the hydrodynamic anchor and increasing its efficiency.

Keywords: raft drift velocity, hydrometeorological drift conditions, cable tension, orbital velocity, small hydrodynamic anchor, wind speed, dimensionless coefficient.

For citation:
Roslyakova, Oksana V. and V. I. Sichkarev. "Development of a design methodology for a hydrodynamic anchor in raft drift theory." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.3 (2026): 365–381. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-365-381.

Введение (Introduction)

Одним из приоритетов в развитии поисково-спасательной техники является создание эффективных коллективных средств спасения, размещаемых на морских судах. Тема обеспечения безопасности на всех видах водного транспорта указана в федеральном документе «Морская доктрина Российской Федерации»[1], а также обсуждается в исследовании [1]. При этом эффективность следует понимать в смысле обеспечения выживаемости спасающихся, которая снижается при увеличении времени проведения поисково-спасательной операции.

Научная работа по совершенствованию спасательных средств судна в направлении снижения их дрейфа под действием гидрометеорологических условий ведется в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта» (далее — ФГБОУ ВО «СГУВТ») на протяжении последних семи лет с разработкой различных моделей гидродинамичесих якорей (ГДЯ) [2–4]. В работе [5] представлено применение дифференциального метода анализа работы ГДЯ с компьютерным моделированием задачи обтекания крыла ГДЯ, который позволил получить адекватный результат работы ГДЯ на рабочем ходу. Полученный результат использован для количественного определения установочного угла ГДЯ относительно якорного троса. Между тем попытка распространить дифференциальный метод анализа на весь период колебаний ГДЯ к ожидаемому результату, наблюдаемому в экспериментах, не привела к положительному результату, что потребовало проведения дополнительных исследований.

В работе [6] разработана модель формирования параметров волнения с учетом скорости движения тропического циклона, скорости ветра в циклоне и пути разгона волн. Авторами работы [7] представлена аналитическая модель для описания волн в тропических циклонах, где разработанный аналитический критерий усиления волн позволяет быстро оценить общие характеристики каждого шторма, особенно ожидаемую асимметрию волнового поля. Авторы работы [8] предлагают параметрическую модель, описывающую равномерное развитие ветровых волн

[1] Указ Президента РФ от 13.08.2024 N 691 (ред. от 08.12.2025) «О Морской коллегии Российской Федерации» (вместе с «Положением о Морской коллегии Российской Федерации»).

на ограниченной длине разгона волн с ограниченной продолжительностью воздействия. Ключевым отличием модели является универсальность самоподобной формы волновых спектров как для условий ограниченной длины разгона волн, так и для условий ограниченной продолжительности воздействия.

В работе [9] рассмотрены способы изучения линейных тенденций и межгодовой изменчивости ветрового давления, турбулентного теплового потока и завихренности ветрового давления в Индийском океане. В работе [10] описано влияние качки на дрейфовые силы, действующие на плавучее сооружение в условиях мелководья. Результаты расчета показали, что влияние качки проявляется довольно значительно в области низких и средних частот, но отсутствует в области высоких частот. В работе [11] выполнено исследование влияния отдельных видов качки на составляющие дрейфовых сил и показаны результаты расчета сил волнового дрейфа судна на мелководье различных глубин. Представленные исследования показали, что амплитуды отдельных видов качки оказывают значительное влияние на моменты и силы волнового дрейфа.

В рассмотренных работах не выявлено влияние ветроволнового процесса на дрейф спасательного плота, что подтверждает актуальность проводимых исследований научным коллективом СГУВТ по решению вопросов создания эффективных средств снижения скорости дрейфа плота и проектирования зависимости технических характеристик средств снижения скорости дрейфа в зависимости от условий эксплуатации судна.

Проведение поисково-спасательных операций после высадки экипажа на спасательные средства (СС) в сложных гидрометеорологических условиях иногда требует достаточно продолжительного периода времени, в течение которого площадь зоны сноса СС увеличивается пропорционально квадрату скорости их дрейфа. Отсюда следует важность снижения скорости дрейфа СС, что актуализирует работу по созданию и совершенствованию ГДЯ, а также работу по их исследованию и проектированию. Конечная цель исследований ГДЯ заключается в полном изучении характера работы ГДЯ в составе системы СС – соединительный трос – ГДЯ с тем, чтобы обоснованно направить эвристические усилия на совершенствование устройства ГДЯ, экспериментальное получение гидродинамических характеристик ГДЯ и разработку методологии проектирования ГДЯ в теории дрейфа плота.

Для разработки методологии проектирования гидродинамического якоря в рамках теории дрейфа плота был выполнен комплекс задач, включающий определение и оценку гидродинамических сил, действующих на якорь; анализ эффективности якоря в качестве средства удержания плота, а также обоснование методов экспериментального определения рабочих параметров якоря в различных гидрометеорологических условиях.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Численное моделирование сопротивления плота ПСН-6 проведено А. А. Абрамовым и А. Э. Моревым в программных пакетах Ansys SpaceClaim Direct Modeler и Ansys Fluent Meshing в рамках НИОКР ФГБОУ ВО «СГУВТ» «Совершенствование средств снижения дрейфа спасательных плотов морских судов с целью снижения риска гибели людей и издержек поисковых работ в спасательных операциях» № 122062100069-3 от 21.06.2022 г.

Боковой вид плота со стороны входного отверстия представлен на рис. 1, значения вертикальной (подъемной) силы и силы сопротивления ветровому потоку со стороны входа приведены в табл. 1. Площадь надводного сечения плота составляет $S_{нв} = 2 \cdot 1{,}034$ м^2, площадь подводного сечения плота — $S_{пв} = 2 \cdot 0{,}4783$ м^2.

Выбор направления со стороны входного отверстия обусловлен тем, что отсюда экипажем плота может быть поставлено средство снижения скорости дрейфа плота в виде штатного плавучего якоря или в виде ГДЯ. Поэтому плот развернется входом навстречу ветру, а дрейфовать будет так, что поток воды будет направлен навстречу дрейфу плота. Поскольку подводные карманы по периметру плота формируют подобие подковы, движение воды будет направлено снаружи от нее.

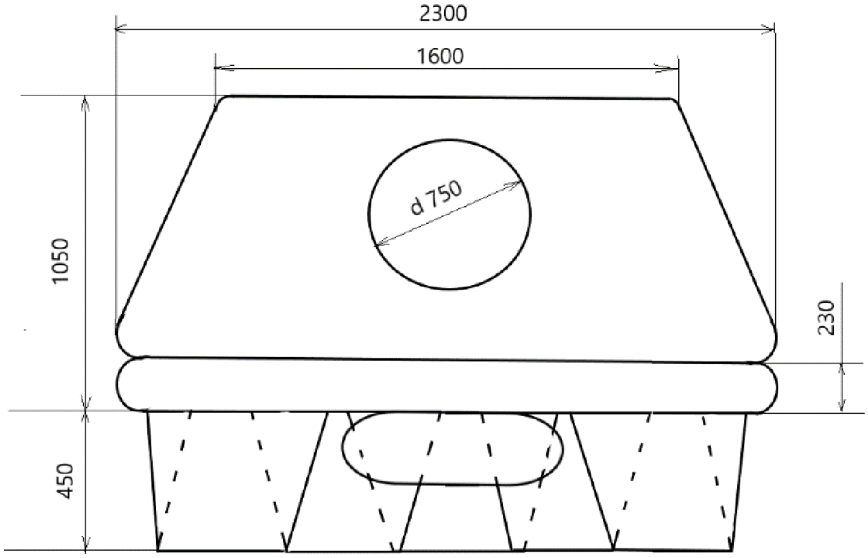


Рис. 1. Схема надводной и подводной частей плота
Fig. 1. Schematic Diagram of the Above-Water and Submerged Parts of the Liferaft

Таблица 1

Силы, действующие на надводную часть плота со стороны входа (среднее значение $k_{хв}$ = 0,55220 ± 0,01730 = $k_а$)

Table 1

Forces Acting on the Above-Water Part of the Liferaft from the Entrance Side (Mean Value $k_{хв}$ = 0,55220 ± 0,01730 = $k_а$)

Скорость, м/с	Вертикальная сила *Y*, Н	Сила сопротивления *X*, Н	Коэффициент воздушного сопротивления $k_{хв}$
10	389,7	68,32	0,539376
8	253,02	43,8	0,540303
6	152,3	24,78	0,543428
4	72,18	11,3	0,557573
2	20,2	2,94	0,580271

Силы, действующие на подводную часть плота, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Силы, действующие на подводную часть плота снаружи подковы (среднее значение $k_{хп}$ = 0,747110 ± 0,001294 = $k_п$)

Table 2

Forces Acting on the Submerged Part of the Liferaft from Outside the Horseshoe (Mean Value $k_{хп}$ = 0,747110 ± 0,001294 = $k_п$)

Скорость, м/с	Сила *Y*, Н	Сила *X*, Н	Коэффициент подводного сопротивления $k_{хп}$
0,4	109,6	52,2	0,748085
0,6	247,22	117,4	0,747766
0,8	440,2	208,6	0,747368
1	688,6	325	0,745219

Скорость дрейфа плота может быть найдена из условия равенства аэродинамических сил дрейфа и подводных сил сопротивления:

$$F_а = F_п. \tag{1}$$

Раскрывая содержание этих сил, получим

$$\frac{1}{2}k_а\rho_а U^2 S_н = \frac{1}{2}k_п\rho_в v^2 S_п, \tag{2}$$

где $\rho_а$, $\rho_в$ — плотность воздуха и воды, кг/м^3;

$k_а$, $k_п$ — коэффициенты аэродинамического и подводного сопротивления плота;

$S_н$, $S_п$ — соответственно площади надводного и подводного сечений плота;

U, v — соответственно скорость ветра и дрейфа плота, м/с.

Из уравнения (2) находим скорость дрейфа плота без применения средств снижения скорости дрейфа, используя средние значения коэффициентов сопротивления из табл. 1 и 2:

$$v^2 = \frac{0,5k_а\rho_а S_н}{0,5k_п\rho_в S_п}U^2 = k_д^2 U^2, \tag{3}$$

где

$$k_д^2 = \frac{k_а}{k_п}\frac{\rho_а}{\rho_в}\frac{S_н}{S_п} = \frac{0,55220}{0,74711}\frac{1,225}{1025}\frac{2,068}{0,9566} = 0,0019096;$$

$$k_д = 0,043699,$$

Для проверки адекватности математической модели выполнен расчет скорости дрейфа плота для нескольких значений скорости ветра (от 6 до 20 м/с с шагом 2). На рис. 2 представлен сравнительный анализ полученных расчетных данных скорости дрейфа, наиболее близких к плоту плавсредств согласно табл. 2.22 Мореходных таблиц МТ-2000[2]. Для сравнения приведем данные по скорости дрейфа плота с тем же МЛГДЯ в натурном сопоставительном эксперименте [3]: при средней скорости ветра v = 7,4 м/с средняя скорость дрейфа плота v = 0,64 уз, что примерно соответствует графику (0,63 уз) на рис. 2.

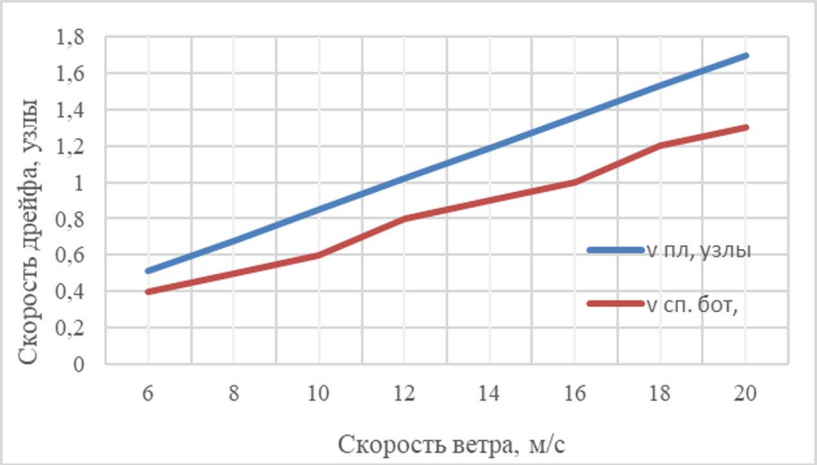


Рис. 2. Сравнение расчетной скорости дрейфа плота и спасательного бота
Fig. 2. Comparison of the Calculated Drift Velocity of the Liferaft and the Lifeboat

[2] Мореходные таблицы МТ-2000: справочник / Под общ. ред. К. А. Емец, Н. М. Груздев, Э. С. Бородин, В. Н. Костин. СПб.: Изд-во ЦКФ ВМФ, 2002. С. 303.

Как видно из графика, скорость дрейфа спасательного плота выше скорости дрейфа спасательного бота ввиду массо-габаритных характеристик, но в целом полученную математическую модель (3) можно признать удовлетворительной.

При испытаниях малого ленточного ГДЯ (МЛГДЯ) на кривошипном стенде (КШС) было выявлено четыре этапа полного цикла колебаний ГДЯ без четкого разделения границ: 1-й этап — рабочий ход; 2-й этап — буксировка ГДЯ кривошипом; 3-й этап — холостой ход; 4-й этап — выборка слабины троса (табл. 3).

Таблица 3

Основные этапы цикла колебаний МЛГДЯ при α = 25°; τ = 8 с; истинном периоде цикла $\tau_и$ = 9, 078 с

Table 3

Main Stages of the Oscillation Cycle of the Small Ribbon-Type Hydrodynamic Anchor at α = 25°; τ = 8 s; Actual Cycle Period τ_i = 9,078 s

Параметры	Этапы			
	1. Рабочий ход ГДЯ. Трос натягивается. ГДЯ возвращается в рабочее положение и начинает активно идти на ветер. Угол отклонения троса нарастает	2. Этап принудительной буксировки ГДЯ кривошипом. Трос натянут. Изменение угла отклонения троса стабилизируется	3. Холостой ход ГДЯ. Кривошип опускается. Трос постепенно ослабевает и провисает. ГДЯ погружается медленнее, чем провисает трос	4. Выбирается слабина троса. ГДЯ продолжает погружаться
ε°	284–360–30	30–121	127–210	215–280
γ°	0–30	30–35	34–20	20–0

ε — угол положения кривошипа; γ — угол положения троса.

Последний этап выполняется за счет сокращения первого этапа, поэтому может быть отнесен к паразитическому свойству этой модели МЛГДЯ. Его возникновение заставляет задуматься над серьезным усовершенствованием конструкции для обеспечения значительно большей скорости погружения на холостом ходу.

Испытанный образец МЛГДЯ на холостом ходу при ослаблении троса начинает скольжение назад, круто разворачивается в вертикальной плоскости на заднем ходу более чем на 180°, теряет инерцию заднего хода и в течение некоторого времени зависает в этом положении, не выбирая всей освободившейся длины троса; после остановки движения по инерции заднего хода начинает опускаться до тех пор, пока не закончится выборка слабины троса. Затем трос начинает разворачивать ГДЯ в направлении восстановления его рабочего положения, после чего ГДЯ готов к этапу рабочего хода. Поэтому в начале рабочего хода (по положению кривошипа) трос остается не выбранным втугую, а на выбор оставшейся слабины расходуется часть режима рабочего хода. Затем следует оставшаяся часть рабочего хода, когда МЛГДЯ приведен в рабочее положение и на нем начинается активное генерирование полезных гидродинамических сил. Рабочий ход доводит гидродинамические силы до максимума (с рывком в натяжении троса, очевидно вызванным силой инерции ГДЯ при выходе ее на рабочий режим) с одновременным увеличением угла отклонения γ троса от вертикали. Далее начинается этап буксировки МЛГДЯ кривошипом, при котором угол отклонения троса γ достаточно быстро переходит в новый режим (см. рис. 3). Увеличение угла отклонения троса γ на этом этапе, по-видимому, обусловлено не возрастанием гидродинамической силы на ГДЯ, а понижением верхней точки крепления троса на кривошипе при незначительном изменении положения нижней точки троса.

Активную гидродинамическую силу можно представить в виде двух ортогональных проекций, одна из которых натяжение троса *F*. Ортогональная ей сила *N* отклоняет трос на угол γ, не влияя на его натяжение. Для вычисления ортогональной силы *N* разработана математическая модель, основанная на численном дифференцировании орбитальной и тангенциальной скорости ГДЯ, вычислении инерционной составляющей $F_{ин}$ и учете сил веса ГДЯ (здесь не приводится). Результаты расчета ортогональной силы *N* приведены на рис. 3.

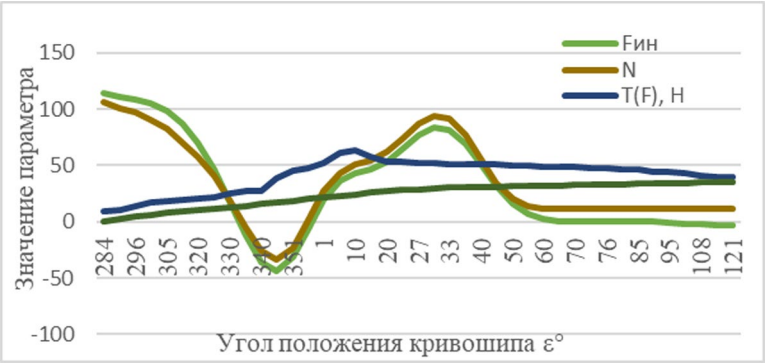


Рис. 3. Соотношение действующих сил и угла отклонения троса γ на этапах рабочего хода и буксировки

Fig. 3. Relationship between the Acting Forces and the Cable Deflection Angle γ during the Working-Stroke and Towing Stages

Для сдерживания дрейфа плота необходим учет проекции натяжения троса *F* на горизонтальную ось: силы $F \cdot \sin\gamma$. Соотношение действующей на МЛГДЯ гидродинамической силы *F* и угла отклонения троса γ представлено на рис. 4.

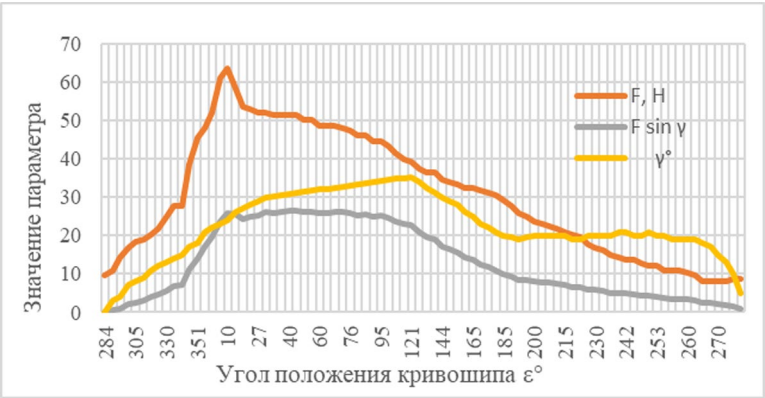


Рис. 4. Соотношение параметров МЛГДЯ в течение полного цикла колебаний

Fig. 4. Relationship between the Parameters of the Small Ribbon-Type Hydrodynamic Anchor during a Complete Oscillation Cycle

Аппроксимацию проекции $F_т \cdot \sin\gamma$ удобно раздробить на участки ε = 284° – 340°; 340° – 360°; 0° – 10°; 10° – 121°; 121° – 284°:

$$F_m \sin\gamma = F_1 = 0{,}14286 \cdot \varepsilon° - 40{,}57143;\ F_2 = 0{,}565 \cdot \varepsilon° - 184{,}1;$$
$$F_3 = 0{,}670 \cdot \varepsilon° + 19{,}3;\ F_4 = 25;\ F_5 = 0. \quad (4)$$

В уравнение дрейфа (1) теперь нужно добавить сопротивление МЛГДЯ:

$$F_a = F_n + F_i, \quad (5)$$

откуда скорость дрейфа плота с учетом параметров МЛГДЯ, аналогично (3), составит

$$v^2 = k_д^2 U^2 - \frac{F_i}{0,5 k_n \rho_в S_n} = 0,0019096 U^2 - 0,002730 F_i . \quad (6)$$

Наибольшее значение в течение всего цикла проекция F_i имеет на этапе буксировки: $F_4 = 25$ Н. Рассмотрим, как на этом участке может изменить скорость дрейфа (6) испытанный образец МЛГДЯ:

$$v^2 = 0,0019096 U^2 - 0,002730 \cdot 25. \quad (7)$$

Возникает вопрос выбора значения скорости ветра U. Например, согласно современной шкале Бофорта[3] (табл. 4), периоду волн $\tau_и = 9$ с, для которого получены экспериментальные значения сил на рис. 3 и 4, в реальных морских условиях соответствует ветер, скорость которого составляет $U = 17$ м/с.

Таблица 4

Фрагмент современной шкалы Бофорта с параметрами ветрового волнения

Table 4

Excerpt from the Modern Beaufort Scale with Wind Wave Parameters

Сила ветра, баллы	Скорость ветра, м/с	Состояние поверхности моря, баллы	$h_{3\%}$, м	$h_{1/3}$, м	$\bar{\tau}$, с	$\bar{\lambda}$, м	Время действия ветра, ч
0	0–0,2	0	0	0	0	0	0
1	0,3–1,5	1	≤ 0,25	0,1	0,5	0,3	0,3
2	1,6–3,3	2	0,25–0,75	0,2–0,6	1,5	2	0,6
3	3,4–5,4	3	0,75–1,25	0,6–1,0	3	6	2
4	5,5–7,9	4	1,25–2,00	1,0–1,5	4	15	4
5	8,0–10,7	4	1,25–2,00	1,0–1,5	5	30	8
6	10,8–13,8	5	2,0–3,5	1,5–3,0	7	50	12
7	13,9–17,1	6	3,5–6,0	3–5	8	70	20
8	17,2–20,7	7	6,0–8,5	5–7	10	100	30
9	20,8–24,4	8	8,5–11,0	7–8	12	150	50
10	24,5–28,4	8	8,5–11,0	7–8	14	200	60
11	28,5–32,6	9	≥ 11	≥ 8	16	250	90
12	≥ 32,7	9	≥ 11	≥ 8	18	300	100

Подставляя значение $U = 17$ м/с в уравнение (7), получим

$$v^2 = 0,551817 - 0,06825 .$$

Без МЛГДЯ скорость дрейфа плота составляет $v = 0,74284$ м/с, а с МЛГДЯ $v = 0,69539$ м/с, т. е. снижение скорости составило около 6,4 %. Если скорость ветра выбирать по высоте волн $h = 1,5$ м, соответствующих удвоенному радиусу кривошипа в экспериментах на КШС, то скорость

[3] *Маков Ю. Л.* Качка судов : учеб. пособие для студентов вузов и курсантов Военно-морского инженерного института, обучающихся по специальности 180101.65 «Кораблестроение», направление подготовки дипломированных специалистов 180000 «Морская техника». Калининград: КГТУ, 2007. 322 с.

ветра $U = 8$ м/с, а скорости дрейфа плота без/с ГДЯ составляют 0,34957/0,23227 м/с, что дает снижение скорости дрейфа на 33,55 %.

При условии снижения скорости дрейфа до нуля из (6) получим уравнение

$$0,0019096U^2 = 0,002730F_i, \tag{8}$$

откуда получим значение требуемой силы F при различной скорости ветра:

$$F_i = F \cdot \sin\gamma = \frac{0,0019094}{0,00273}U^2 = 0,69941U^2. \tag{9}$$

При выбранной скорости ветра 17 м/с сопротивление МЛГДЯ должно составлять $F \sin\gamma =$ $= 202$ Н. Для этого площадь МЛГДЯ должна быть

$$S_{\text{млгдя}} = \frac{202}{25}0,174 = 1,41 \text{ м}^2.$$

Совершенно очевидно, что МЛГДЯ испытанного типа для полной остановки дрейфа плота путем пропорционального изменения размеров непригоден.

Уравнение (5) представляет собой математическую модель работы ГДЯ для компенсации дрейфа плота до назначенного уровня на этапе рабочего хода ГДЯ. На этапе холостого хода плот, участвуя в волновом орбитальном почти круговом движении, возвращается навстречу движению волны (без учета ветровой составляющей дрейфа), поэтому компенсации этого движения не требуется. Поскольку этап рабочего хода характеризуется переменной силой F и переменным углом γ, очевидно, что это уравнение должно удовлетворяться либо в среднем за период колебания, либо пересчетом на работу сил за период цикла колебаний.

Результаты (Results)

Для задач проектирования ГДЯ под заданными условиями дрейфа плота полезно представлять действующие силы в безразмерном виде, используя в качестве характерных изменяемые параметры, наиболее соответствующие изменяющимся условиям. Например, в различных гидрометеорологических условиях изменяющимися параметрами будут скорость ветра U, высота h и периоды τ волн, а изменяющимся геометрическим параметром ГДЯ — его площадь S при неизменном конструктивном типе ГДЯ. Обобщающим параметром высот и периодов волн может служить амплитуда орбитальной скорости частиц воды в волновом движении[4]:

$$v_{\text{орб}} = \frac{\pi h}{\tau}.$$

Орбитальную скорость можно использовать в качестве определяющего характерного кинематического параметра для приведения к безразмерному виду сил, действующих на ГДЯ.

Представим $F_{\text{а}}$ и $F_{\text{п}}$ в виде (2), а натяжение троса $F_{\text{т}}$ в следующем виде:

$$F_{\text{т}} = \frac{1}{2} f_{\text{орб}} \rho_{\text{в}} S_{\text{ГДЯ}} v_{\text{орб}}^2, \tag{10}$$

где $f_{\text{орб}}$ — безразмерный коэффициент натяжения троса, рассчитанный относительно орбитальной скорости;

$S_{\text{ГДЯ}}$ — эффективная площадь ГДЯ, м^2;

$V_{\text{орб}}$ — орбитальная скорость волны, соответствующей сравниваемой скорости ветра U; она же — орбитальная скорость вращения точки подвеса троса на кривошипе КШС.

[4] *Луговский В. В.* Динамика моря : избранные вопросы, связанные с изучением мореходности корабля: учебник для втузов по специальности «Гидроаэродинамика». Л. : Судостроение, 1976. 199 с.

Безразмерный коэффициент натяжения троса $f_{орб}$ рассчитанный относительно орбитальной скорости, определяем по формуле

$$f_{орб} = \frac{F_т}{0,5\rho_в S_{гдя} v_{орб}^2}. \quad (11)$$

Тогда уравнение (5) можно записать в виде выражения для квадрата скорости ветрового дрейфа:

$$v_{вд}^2 = k_д^2 U^2 - f_{орб} \frac{S_{гдя}}{k_п S_п} \cdot \sin\gamma \cdot v_{орб}^2, \quad (12)$$

где $v_{орб} = \frac{\pi h}{\tau}$ — модуль орбитальной скорости определяемый параметрами волн h, τ, соответствующими скорости ветра U.

Для представления h и τ в виде функциональной зависимости от скорости ветра в реальных среднестатистических условиях выполним аппроксимацию h и τ по данным современной шкалы Бофорта.

Аппроксимация среднего периода волн через скорость ветра, по данным шкалы Бофорта, представлена в виде

$$\overline{\tau} = 0,05U^{1,23} + 0,435U. \quad (13)$$

Графически на рис. 5 представлена аппроксимация среднего периода волн через скорость ветра.

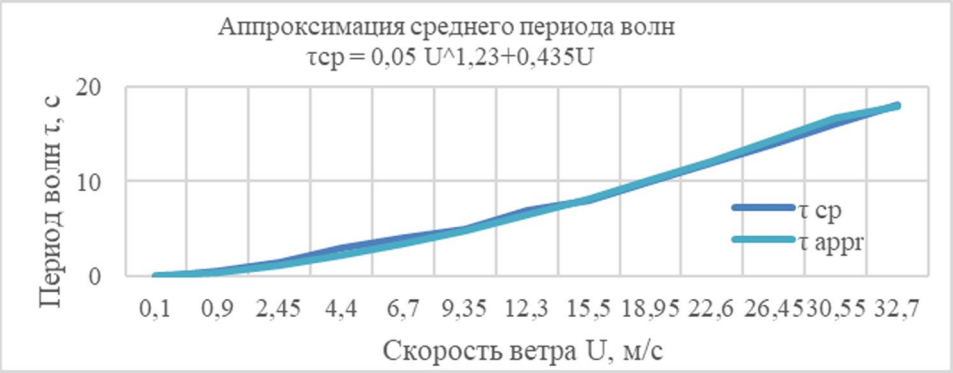


Рис. 5. Аппроксимация среднего периода волн через скорость ветра
Fig. 5. Approximation of the Mean Wave Period as a Function of Wind Speed

Аппроксимация высот волн через скорость ветра по данным шкалы Бофорта представлена в виде уравнения

$$h_{3\%} = 0,05U^{1,55} + 0,085U. \quad (14)$$

Графически на рис. 6 представлена аппроксимация высот волн через скорость ветра по данным шкалы Бофорта.

С учетом приведенных аппроксимаций модуль орбитальной скорости

$$v_{орб} = \frac{\pi h}{\tau} = \pi \frac{0,05U^{1,55} + 0,085U}{0,05U^{1,23} + 0,435U}. \quad (15)$$

На рис. 7 показана зависимость модуля орбитальной скорости $V_{орб}$ водной среды на поверхности со скоростью ветра U.

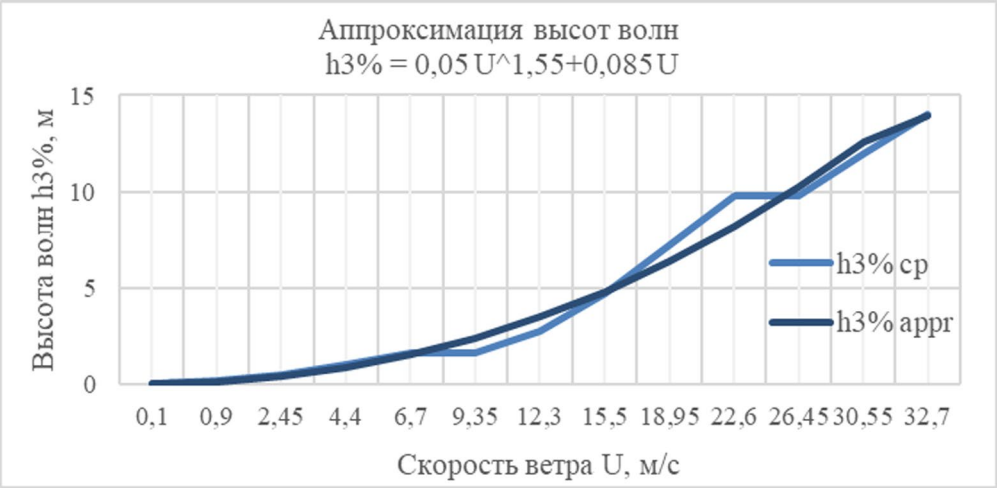


Рис. 6. Аппроксимация высот волн 3%-й обеспеченности через скорость ветра
Fig. 6. Approximation of 3% Exceedance Wave Heights as a Function of Wind Speed

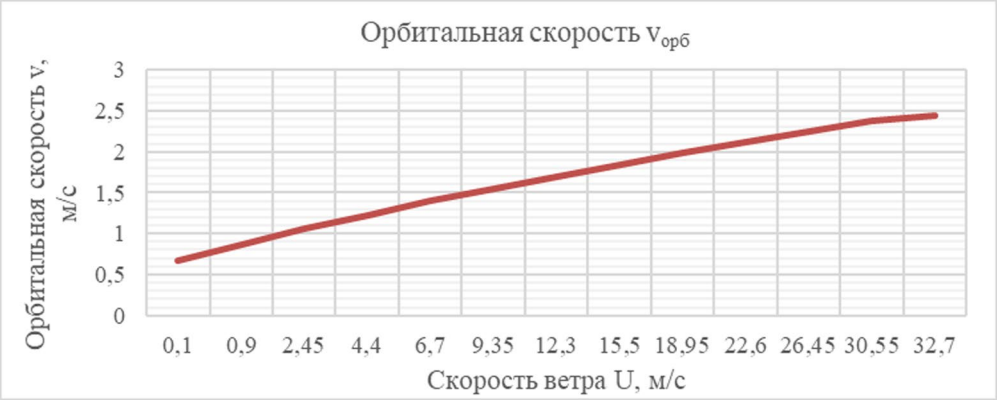


Рис. 7. Связь модуля орбитальной скорости $v_{орб}$ водной среды на поверхности со скоростью ветра U
Fig. 7. Relationship between Surface Water Orbital Velocity Vorb and Wind Speed U

В табл. 5 представлены значения орбитальной скорости и скорости ветра.

Таблица 5

Значения орибитальной скорости и скорости ветра

Table 5

Values of Orbital Velocity Vorb and Wind Speed U

U, м/с	0,1	0,9	2,45	4,4	6,7	9,35	12,3
$v_{орб}$, м/с	0,67	0,86	1,06	1,23	1,39	1,55	1,70
U, м/с	15,5	18,95	22,6	26,45	30,55	32,7	–
$v_{орб}$, м/с	1,84	1,99	2,12	2,25	2,38	2,45	–

Упрощающую аппроксимацию модуля орбитальной скорости (6) водной массы на поверхности воды через скорость ветра U (рис. 8) можно представить в виде уравнения

$$v_{орб} = (U + 1)^{0,295} - 0,4. \quad (16)$$

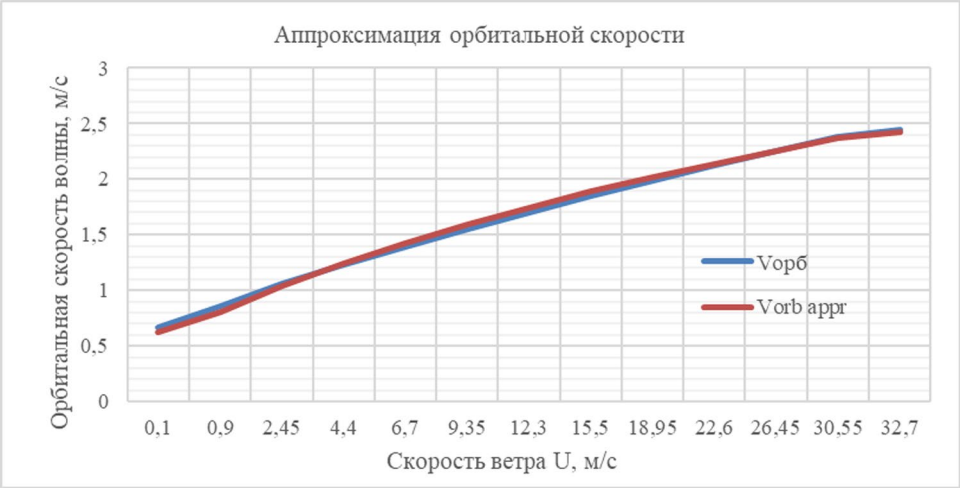


Рис. 8. Аппроксимация модуля орбитальной скорости жидкости в волне
Fig. 8. Approximation of the Magnitude of the Orbital Velocity of Fluid Particles in a Wave

В описываемом эксперименте МЛГДЯ на КШС с параметрами, приведенными к высотам h = 1,5 м и периодам волн $\tau_и$ = 9 с, модуль орбитальной скорости составил

$$v_{орб} = 0{,}5236 \text{ м/с}. \tag{17}$$

Таким образом, введением в проектировочные параметры ГДЯ орбитальной скорости водной массы, вместе с плотом участвующей в волновом движении и тем самым определяющей нестационарный скоростной режим обтекания ГДЯ, удается назначить для испытаний ГДЯ необходимые установочные стендовые параметры. Одновременно учитывая, что орбитальная скорость есть отношение двух важнейших параметров h и τ, на стенде с ограниченными размерами представляется возможным получить нужные значения орбитальных скоростей варьированием этих параметров.

Обсуждение (Discussion)

С постоянным значением орбитальной скорости (17) график безразмерного коэффициента $f_{орб}$ по конфигурации повторяет график натяжения троса (рис. 9).

Рис. 9. Коэффициент натяжения троса $f_{орб}$
по характерной скорости орбитального движения $v_{орб}$
Fig. 9. Cable Tension Coefficient f_{orb} Calculated
with Respect to the Characteristic Orbital Motion Velocity v_{orb}

В то же время общепринято в теории крыла учитывать реальную скорость потока, обтекающего крыло на некотором удалении, где деформация потока крылом несущественна. В необращенном движении ГДЯ скорость невозмущенного потока определяется движением самого ГДЯ, состоящего из движения троса кривошипом (составляющая скорости $V_к$, а действующая сила F) и движения ГДЯ в перпендикулярном тросу направлении (составляющая скорости V_G, действующая сила N по нормали к тросу). В связи с тем, что ортогональная сила N не влияет на натяжение троса, расчет упрощается и производится по одной действующей силе F по формуле

$$F = \frac{1}{2} f \rho_в S_{ГДЯ} V^2 . \tag{18}$$

Из формулы (18) определяется безразмерный коэффициент натяжения троса f, результаты расчета которого представлены на рис. 10. На рис. 11 показано соотношение скоростей $V_к$, V_G, полной скорости V и угла натекания потока χ при движении ГДЯ на этапах рабочего хода и буксировки.

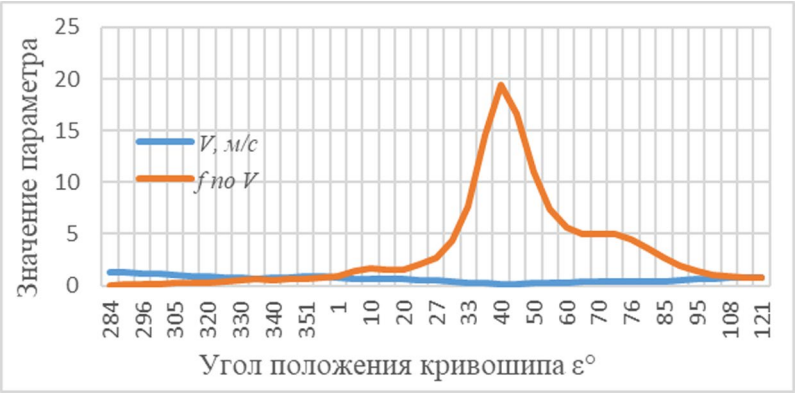


Рис. 10. Безразмерный коэффициент натяжения троса *f*, вычисленный по полной скорости *U* движения ГДЯ
Fig. 10. Dimensionless Cable Tension Coefficient *f* Calculated from the Total Velocity *U* of the Hydrodynamic Anchor

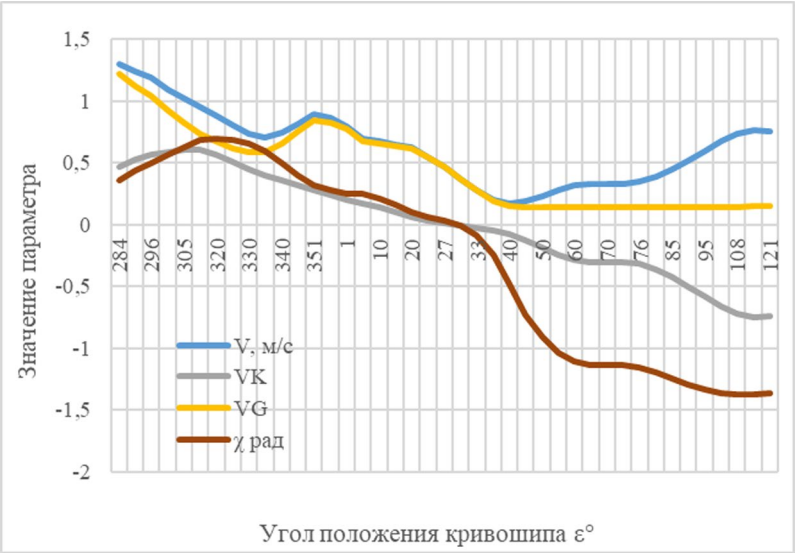


Рис. 11. Соотношение скоростей Vк, VG, полной скорости V и угла натекания потока χ при движении ГДЯ на этапах рабочего хода и буксировки
Fig. 11. Relationship between the Velocities Vк, VG , the Total Velocity Vand the Flow Incidence Angle χ during Hydrodynamic Anchor Motion at the Working-Stroke and Towing Stages

Отличительная особенность нестационарного движения ГДЯ от стационарного обтекания при постоянной скорости и угле натекания потока состоит в том, что составляющие скорости потока и его полная скорость не остаются постоянными, а непрерывно изменяются как по величине, так и по направлению. Поэтому в отличие от стационарного режима, когда гидродинамический коэффициент остается практически постоянной величиной, при нестационарном движении он представляет собой функцию непрерывно изменяющихся параметров движения (кривая *f* на рис. 10). Параметры движения (составляющая скорости $V_к$) в реальном процессе определяются высотой *h* и периодом τ волны, а составляющая скорости V_G — свойствами ГДЯ, которые можно получить пока только экспериментальным путем, моделируя параметры волны *h*, τ.

В связи с этим возникают две важные задачи: согласовать в экспериментах параметры волны с реальными параметрами волн и минимизировать объем экспериментальных работ. Один из приемов минимизации экспериментальных работ заключается в переходе к безразмерным величинам, используя в качестве характерных параметров такие, которые необходимо минимизировать.

Представляет интерес сохранение в расчетах безразмерного натяжения троса *f* орбитальной скорости $V_{орб}$, с учетом истинной скорости *V* движения ГДЯ. Для этого представим натяжение троса через безразмерный коэффициент *f* и фактическую скорость движения ГДЯ *V*, представленную в выполненных расчетах ~~своими~~ проекциями на линию троса $V_К$ и на нормаль к тросу V_G, умножив и разделив правую часть на квадрат орбитальной скорости $V_{орб}$:

$$F = \frac{1}{2} f \rho_в S_{ГДЯ} V^2 \frac{V_{орб}^2}{V_{орб}^2} = \frac{1}{2} \rho_в S_{ГДЯ} f \frac{V^2}{V_{орб}^2} V_{орб}^2 . \quad (19)$$

Отношение квадратов скоростей *V* и $V_{орб}$ обозначим коэффициентом k_v,

$$k_v = \frac{V^2}{V_{орб}^2} , \quad (20)$$

и дополним его коэффициентом гидродинамической силы *f*, обозначив этот коэффициент $f_{доп}$,

$$f_{доп} = f k_v . \quad (21)$$

С учетом выражений (10) и (11) запишем

$$f_{доп} = f_{орб.} \quad (22)$$

Результаты расчетов по формулам (21) и (22) представлены на рис. 12.

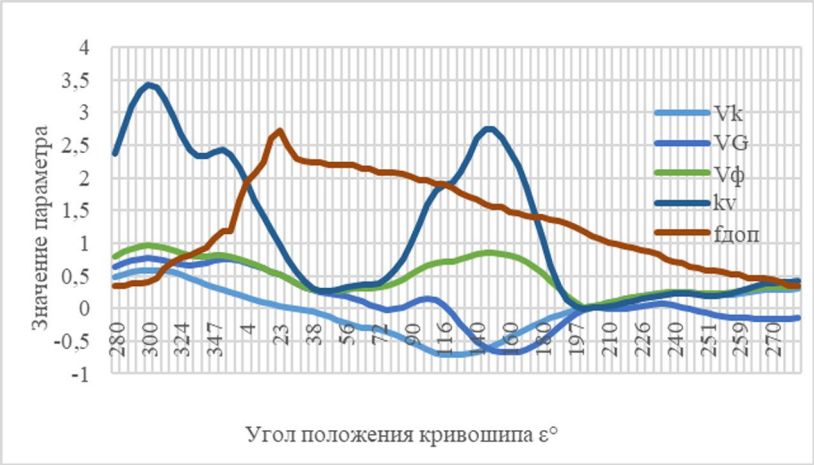


Рис. 12. Переход к учету орбитальной скорости в представлении дополненного безразмерного натяжения троса $f_{доп}$

Fig. 12. Transition to Incorporating Orbital Velocity into the Representation of the Augmented Dimensionless Cable Tension f_{add}

Возвращаясь к описанию скорости ветрового дрейфа (12), в правой части дробный член при квадрате скорости ветра зависит только от параметров надводной и подводной частей корпуса плота (см. формулу (3)):

$$k_{\text{д}}^2 = \frac{k_a}{k_n}\frac{\rho_a}{\rho_{\text{в}}}\frac{S_{\text{н}}}{S_n}. \tag{23}$$

Сомножители при квадрате орбитальной скорости зависят от характеристик ГДЯ и параметров подводной части плота; обозначим в виде

$$k_{\text{ГДЯ}} = \frac{1}{k_n}\frac{S_{\text{ГДЯ}}}{S_n}. \tag{24}$$

В итоге скорость ветрового дрейфа представляется в виде достаточно удобного выражения:

$$v_{\text{ВД}}^2 = k_{\text{д}}^2 U^2 - f \cdot k_v \cdot k_{\text{ГДЯ}} \cdot \sin\gamma \cdot v_{\text{обр}}^2. \tag{25}$$

Таким образом, представленные данные охарактеризовали применение методологии проектирования ГДЯ под заданные параметры дрейфа плота, включающие переход от дифференциального метода анализа системы «плот – трос – ГДЯ», неприменимого в целом вследствие смены принципа работы ГДЯ на разных этапах цикла колебаний к цикловому (интегральному) методу, в котором на отдельных этапах использован дифференциальный метод анализа для получения нормальной силы, но в целом он позволяет перейти к алгебраической математической модели системы «плот – трос – ГДЯ». Полученная модель обобщает все этапы цикла колебаний ГДЯ, в процессе которых происходит смена принципа работы ГДЯ. При этом в течение всего цикла ГДЯ работает в нестационарных условиях обтекания жидкостью, что приводит к необходимости описания гидродинамических коэффициентов его сил в виде функции от орбитального движения плота на волне. Схема взаимодействия различных этапов методологии представлена на рис. 13.

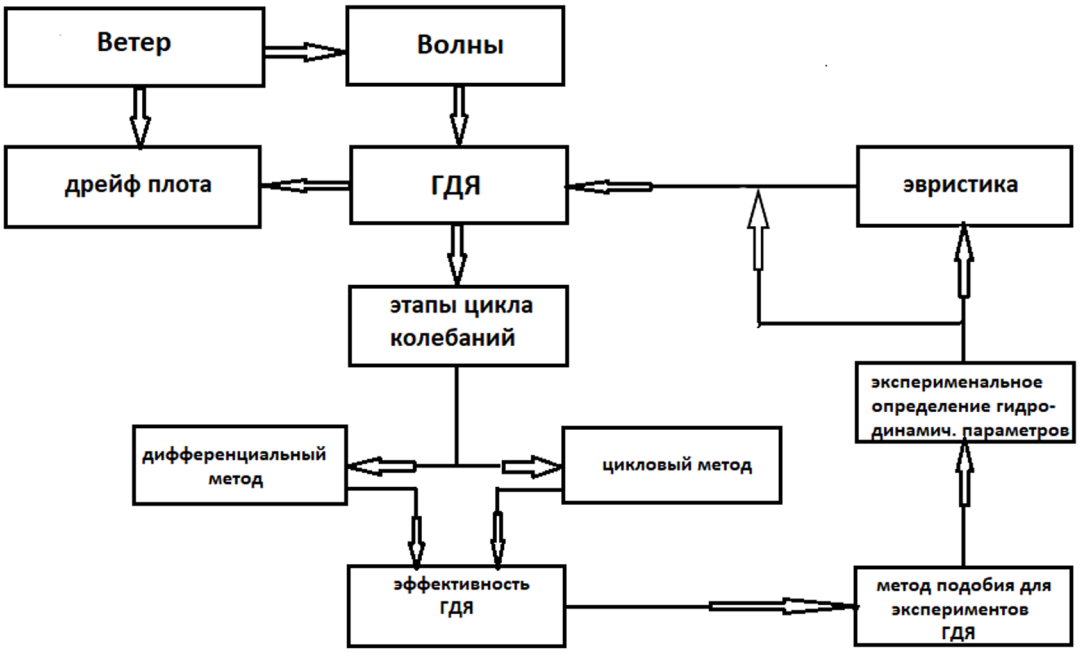


Рис. 13. Блок-схема методологии проектирования ГДЯ
Fig. 13. Flowchart of the Hydrodynamic Anchor Design Methodology

Разработанная модель пригодна для проектирования ГДЯ с заданным снижением скорости дрейфа во всем диапазоне возможных гидрометеорологических условий.

Выводы (Symmaru)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Предложена методология проектирования гидродинамического якоря, рассматриваемая как теоретическая основа для расчета параметров системы «плот – трос – гидродинамический якорь» под заданные характеристики дрейфа плота. Предложенный подход базируется на синтезе гидродинамических исследований и эвристических решений по оптимизации конструкции гидродинамического якоря на различных этапах его работы.

2. Данная методология реализована как совокупность аналитических приемов, принципов расчета и методов экспериментального моделирования, учитывающих конкретные ветро-волновые условия эксплуатации спасательного средства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Илюхин, В. Н.* Основные недостатки в обеспечении безопасности экипажей судов, терпящих бедствие на море, и существующей системы поиска и спасания людей наиболее полно проявляются во время аварий / Морские вести России. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://morvesti.ru/themes/1693/91243/ (дата обращения: 16.02.2026).

2. Экспериментальная проверка эффективности уменьшения дрейфа спасательных плотов якорем присоединенной массы / В. И. Сичкарев, И. А. Иванов, В. В. Кузьмин, А. А. Русскин // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2019. — № 56-57. — С. 19–25. EDN BFDUCS.

3. *Сичкарев В. И.* Проведение натурного сопоставительного эксперимента с гидродинамическими якорями спасательных плотов на Новосибирском водохранилище / В. И. Сичкарев, С. В. Титов, В. В. Коновалов [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2022. — № 3. — С. 28–39. EDN ISKQCY.

4. *Сичкарев В. И.* Гидродинамика крыльевого гидродинамического якоря в физическом эксперименте в прямом опытовом бассейне / В. И. Сичкарев, С. В. Титов, В. В. Коновалов [и др.] // Транспортное дело России. — 2023. — № 6. — С. 282–286. EDN SRBGTZ. DOI: 10.52375/20728689_2023_6_282.

5. Компьютерное моделирование работы крыла гидродинамического якоря / В. И. Сичкарев, А. Н. Хохряков, Ю. С. Покалюхин, А. В. Бабенко // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2022. — № 1. — С. 20–28. EDN XEBSFM.

6. *Bowyer P. J.* The Theory of Trapped-Fetch Waves with Tropical Cyclones—An Operational Perspective / P. J. Bowyer, A. W. MacAfee // Weather and Forecasting. 2005. Vol. 20. Is. 3. Pp. 229 – 244. DOI: 10.1175/WAF849.1.

7. *Kudryavtsev V.* A simplified wave enhancement criterion for moving extreme events / V. Kudryavtsev, P. Golubkin, B. Chapron // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2015. Vol. 120. Is. 11. Pp. 7538–7558. DOI: 10.1002/2015JC011284.

8. *Dulov V.* On fetch- and duration-limited wind wave growth: Data and parametric model / V. Dulov, V. Kudryavtsev, E. Skiba // Ocean Modelling. 2020. Vol. 153. Pp. 101676. DOI: 10.1016/j.ocemod.2020.101676.

9. Bulk Parameterization of Air–Sea Fluxes: Updates and Verification for the COARE Algorithm / C. W. Fairall, E. F. Bradley, J. E. Hare, A. A. Grachev, J. B. Edson // Journal of Climate. 2003. Vol. 16. Is. 4. Pp. 571 – 591. DOI: 10.1175/1520-0442(2003)016<0571:BPOASF>2.0.CO;2.

10. *Аунг (Мьянма) Тан Хтун.* Влияние качки на дрейфовые силы, действующие на плавучее сооружение в условиях мелководья / Тан Хтун Аунг (Мьянма), С. В. Щегорец // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2011. — № 1(117). — С. 287–292. EDN NRERUD.

11. *Ву М. Н.* Исследование влияния качки судна на силы и моменты волнового дрейфа / М. Н. Ву, Т. Т. Х. Фам // Наука, техника и образование. — 2018. — № 8(49). — С. 44–51. EDN RXIRSL.

REFERENCES

1. Morskie vesti Rossii. "Ilyukhin, V. N. Osnovnye nedostatki v obespechenii bezopasnosti ekipazhey sudov, terpyaschikh bedstvie na more, i suschestvuyuschey sistemy poiska i spasaniya lyudey naibolee polno proyavlyayutsya vo vremya avariy." Web. February 16, 2026 < https://morvesti.ru/themes/1693/91243/ >.

2. Sichkarev, V. I., I. A. Ivanov, V. V. Kuz'min and A. A. Russkin. "Eksperimental'naya proverka effektivnosti umen'sheniya dreyfa spasatel'nykh plotov yakorem prisoedinennoy massy." *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 56–57 (2019): 19–25.

3. Sichkarev, V. I., S. V. Titov, V. V. Konovalov et al. "Conducting a full-scale comparative experiment with hydrodynamic anchors of life rafts at the novosibirsk reservoir." *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* 3 (2022): 28–39.

4. Sichkarev, V. I., S. V. Titov, V. V. Konovalov et al. "Hydrodynamics of a wing hydrodynamic armature in a physical experiment in a direct experimental pool." *Transport Business in Russia* 6 (2023): 282–286. DOI: 10.52375/20728689_2023_6_282.

5. Sichkarev, V. I., A. N. Khokhryakov, Yu. S. Pokalyukhin and A. V. Babenko. "Computer simulation of wing operation in a hydrodynamic anchor." Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka 1 (2022): 20–28.

6. Bowyer, P. J. and A. W. MacAfee. "The Theory of Trapped-Fetch Waves with Tropical Cyclones—An Operational Perspective." *Weather and Forecasting* 20.3 (2005): 229 – 244. DOI: 10.1175/WAF849.1.

7. Kudryavtsev, V., P. Golubkin and B. Chapron. "A simplified wave enhancement criterion for moving extreme events." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 120.11 (2015): 7538–7558. DOI: 10.1002/2015JC011284.

8. Dulov, V., V. Kudryavtsev and E. Skiba. "On fetch- and duration-limited wind wave growth: Data and parametric model." *Ocean Modelling* 153 (2020): 101676. DOI: 10.1016/j.ocemod.2020.101676.

9. Fairall, C. W., J. B. Edson et al. "Bulk Parameterization of Air–Sea Fluxes: Updates and Verification for the COARE Algorithm." *Journal of Climate* 16.4 (2003): 571 – 591. DOI: 10.1175/1520-0442(2003)016<0571:BPOA SF>2.0.CO;2.

10. Aung (M'yanma), Tan Khtun and S. V. Schegorets. "Tan Khtun Aung M'yanma. Vliyanie kachki na dreyfovye sily, deystvuyuschie na plavuchee sooruzhenie v usloviyakh melkovod'ya." *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta* 1(117) (2011): 287–292.

11. Vu, M. H. and T. T. Kh. Fam. "Study the influence of the ship's motions on the wave." Nauka, tekhnika i obrazovanie 8(49) (2018): 44–51.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рослякова Оксана Вячеславовна —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»
630099, Российская Федерация, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: *o.v.roslyakova@nsawt.ru*

Сичкарев Виктор Иванович —
доктор техническмих наук, профессор
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»
630099, Российская Федерация, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: *svny89@mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Roslyakova, Oksana V. —
PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Siberian State University of Water Transport
33, Shchetinkina str, Novosibirsk, 630099, Russian Federation
e-mail: *o.v.roslyakova@nsawt.ru*

Sichkarev, Viktor I.—
Grand PhD in Technical Sciences, Professor
Siberian State University of Water Transport
33, Shchetinkina str, Novosibirsk 630099, Russian Federation
e-mail: *svny89@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 12 марта 2026 г.
Received: March 12, 2026.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-382-393 **EDN CWLKUK**

УДК 656.614.32, 656.614.33

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ СУДОВ ПО КРУГОВЫМ МАРШРУТАМ В УСЛОВИЯХ ЧАСТИЧНОЙ ЛЕДОВОЙ ПРОВОДКИ

А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Н. Ситов

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

Предложен методологический подход и алгоритмический инструментарий для имитационного моделирования работы транспортно-логистической системы в указанных условиях. Основу метода составляет формализация системы круговых маршрутов судов ледового класса и линейных ледоколов с помощью дискретного векторного представления, преобразующего циклическую структуру в линейную для упрощения вычислительных процедур. Для автоматизации трудоемкого процесса подготовки исходных данных разработан специальный алгоритм, который на основе графического представления маршрутов и применения волнового алгоритма определяет их полное покоординатное описание, а также формирует дискретный рабочий вектор модели. Это позволяет минимизировать ошибки ручного ввода и обеспечивает воспроизводимость экспериментов. Модель имитирует ключевые технологические процессы: движение судов по маршрутам, формирование очередей на рейдах в пунктах начала ледовой проводки, образование пар «ледокол – судно» и их совместное движение по ледовому участку. В качестве целевых показателей для анализа различных сценариев используются время полного цикла рейса, длительность ожидания в очередях, загрузка ледокольного флота и общая провозная способность системы. Практическая значимость работы заключается в создании инструмента для многовариантного анализа и синтеза параметров арктической логистической цепи. Модель позволяет количественно обосновывать решения по оптимальному составу и количеству судов газовозов и ледоколов, оценивать влияние навигационных условий на регулярность поставок и, как следствие, повышать обоснованность стратегических инвестиционных и оперативных управленческих решений для таких проектов, как «Арктик-СПГ-2». Разработанный подход вносит вклад в развитие методов планирования устойчивых и экономически эффективных перевозок в Арктической зоне Российской Федерации.

Ключевые слова: судоходные маршруты, ледокольная проводка, перевозка сжиженного природного газа, суда ледового класса, круговые маршруты, имитационное моделирование, Северный морской путь.

Для цитирования:
Кузнецов А. Л. Имитационное моделирование движения судов по круговым маршрутам в условиях частичной ледовой проводки / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Н. Ситов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 3. 382–393. EDN CWLKUK. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-382-393.

SIMULATION MODELLING OF VESSEL MOVEMENT ALONG CIRCULAR ROUTES WITH PARTIAL ICEBREAKER ASSISTANCE

A. L. Kuznetsov, A. V. Kirichenko, A. N. Sitov

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

The article proposes a methodological approach and algorithmic tools for the simulation modelling of a transport and logistics system operating under the specified conditions. The method is based on the formalisation of a system of circular routes for ice-class vessels and linear icebreakers using a discrete vector representation, which transforms the cyclic structure into a linear one in order to simplify computational procedures. To automate the labour-intensive process of preparing initial data, a special algorithm has been developed which, based on

a graphical representation of routes and the application of a wave algorithm, constructs their complete coordinate-by-coordinate description and forms the discrete working vector of the model. This makes it possible to minimise manual input errors and ensure the reproducibility of experiments. The model simulates the key technological processes: vessel movement along routes, queue formation at roadsteads at the points where icebreaker assistance begins, the formation of "icebreaker–vessel" pairs, and their joint movement along the ice-covered section. The target indicators used to analyse various scenarios include the total voyage cycle time, queue waiting time, icebreaker fleet utilisation, and the overall carrying capacity of the system. The practical significance of the study lies in the creation of a tool for multivariate analysis and synthesis of the parameters of the Arctic logistics chain. The model makes it possible to provide quantitative justification for decisions on the optimal composition and number of LNG carriers and icebreakers, to assess the influence of navigational conditions on the regularity of deliveries and, consequently, to improve the validity of strategic investment and operational management decisions for projects such as Arctic LNG 2. The developed approach contributes to the advancement of methods for planning sustainable and cost-effective transportation in the Arctic zone of the Russian Federation.

Keywords: shipping routes, icebreaker assistance, liquefied natural gas, transportation, ice-class vessels, circular routes, simulation modelling, the Northern Sea Route.

For citation:
Kuznetsov, Alexandr L., A. V. Kirichenko and A. N. Sitov. "Simulation modelling of vessel movement along circular routes with partial icebreaker assistance." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.3 (2026): 382–393. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-382-393.

Введение (Introduction)

В современных условиях экономические интересы Российской Федерации требуют создания надежного и эффективного канала поставки углеводородного ископаемого сырья, в первую очередь СПГ, из районов его добычи в Арктической зоне страны, в восточном направлении. Эта потребность возникла в связи с изменением конъюнктуры рынка, вызванным политикой недружественных стран, ранее служивших основными потребителями, а также прямыми санкционными действиями США, являющимися главными инициаторами нового порядка. До этого основным существующим и планируемым к развитию направлением являлось западное, для обслуживания которого создавались портовые мощности, планировался и комплектовался грузовой и обслуживающий флот.

Несмотря на то, что оба направления в своей основной части проходят в зонах Северного морского пути, они характеризуются различной ледовой обстановкой, навигационными условиями, а также сложностью судоходства. Восточное направление открыто для плавания судов без ледового класса в течение крайне малого периода, а в наиболее тяжелые периоды требует не только усиленного ледового класса торговых судов (не ниже Arc-7), но и их обязательного ледокольного сопровождения. При этом ледокольное сопровождение необходимо не на всем протяжении маршрута, а лишь на его части, границы которой не фиксированы и устанавливаются меняющимися климатическими и погодным условиями.

Вместе с тем очевидно, что эксплуатационная работа в высоких широтах представляет собой комплексную задачу, где судно ледового класса (СЛК) и линейный ледокол (ЛЛК) работают как единая система в экстремальных условиях. Этим определяется комплекс проблемных вопросов, касающихся как непосредственно выполнения морских операций на оперативном уровне управления, так и общего рейсового планирования групп судов на стратегическом уровне принятия решений. При этом представляется целесообразным выделить укрупненные группы проблем, в конечном итоге влияющих на целевую эксплуатацию СЛК:

Динамические нагрузки в кильватерном канале. При следовании в канале за ледоколом СЛК подвергается не только обычным нагрузкам от контакта с кромками канала, но и специфическим циклическим ударам о ледяные обломки, которые находятся в состоянии частого соударения из-за турбулентности потока от винтов ледокола и собственного хода СЛК. При этом расчетные нагрузки, предусмотренные Правилами классификации и постройки морских судов РМРС, часто носят детерминированный характер и могут не полностью учитывать

случайный спектр ударов высокой частоты в канале. Это приводит к выраженному явлению усталостного накопления повреждений в районах концентрации напряжений в носовой оконечности, в скуловых областях, в соединениях ледовых подкреплений с основным набором, что определяет потребность корректуры планов ТО и ремонтов [1–6].

Взаимодействие со льдом при различных режимах проводки. Критическими являются режимы сжатия льдов и движение в торосистых полях, поскольку при сжатии канал за ледоколом достаточно быстро закрывается, создавая на СЛК внезапное боковое давление льда. В торосистых полях обломки льда, выброшенные винтами ледокола, могут образовывать подводные ледяные скопления, опасные для винторулевой группы СЛК, таким образом, риск повреждения лопастей гребного винта, поломки перьев руля или заклинивания носового подруливающего устройства при неблагоприятных режимах резко возрастает [7, 8].

Поддержание безопасной дистанции и скорости в караване. Существует определённое противоречие между требованиями безопасности и эффективности. Слишком большая дистанция до ледокола ведёт к затиранию канала и риску заклинивания, слишком малая — к риску столкновения с ледоколом при его внезапном торможении или маневре, а также к более тяжелым ледовым ударам из-за потери инерции СЛК для продавливания уже замерзших обломков. Таким образом, требуемый ледовый режим скорости для СЛК отличается от режима ЛЛК, и СЛК вынужден работать на переменных режимах главного двигателя, что ведет к повышенному износу, риску «забросов» частоты вращения и потере управляемости, а с эксплуатационной точки зрения — всё к той же корректуре планов ТО и ремонтов.

В ряде исследований, в частности, в работах [9–11], рассмотрены варианты режимов работы линейных ледоколов при одиночных и групповых регулярных проводках, но за пределами исследований остались сами транспортные суда. Вместе с тем технологический процесс добычи сырья и получения СПГ в Арктической зоне Российской Федерации по своей природе требует непрерывности и стабильности, а возможности буферного хранения продукта крайне ограничены, что требует от транспортный составляющей логистической цепи такой же стабильности и регулярности. Использовать традиционный для практического решения подобных задач избыток транспортного оборудования в данном случае также невозможно, поскольку это связано со значительными инвестиционными затратами (по аналогии с [12]). Иными словами, в указанных условиях возникает задача качественного повышения точности и адекватности методов расчета технологических ресурсов транспортно-логистической цепи: терминальных, буферных емкостей, торгового флота и обеспечивающего его функционирование ледокольного флота в рассмотренных условиях высокой неопределенности систем «СЛК – ЛЛК».

Более того, при возникновении проблем с формированием сбалансированно грузового флота, ледокольного флота и буферного хранения, программа производства должна подстраиваться в соответствии именно с этим ведущим трендом. Очевидно, что создание рационального объема всех ресурсов в краткие сроки невозможно, поэтому весь его ввод в эксплуатацию должен быть тщательно спланирован и скоординирован, поскольку соответствующий избыток или дефицит неизбежно связан с масштабными потерями. В то же время новизна задачи и риски, связанные с неправильными решениями делают малопригодными или вовсе отсутствующими методы расчета провозной способности грузового флота во взаимодействии с ледокольным флотом в меняющихся навигационных условиях, что делает актуальными исследования в данном направлении.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Рассмотрим структуру маршрута СЛК, аналогичную приведенной в публикации [13], но вначале — простой случай транспортировки грузов судами по круговому маршруту от одной начальной до одной конкретной точки, характерный, в частности, для вывоза нефти и сжиженного

природного газа с арктических месторождений России в восточном направлении. В частности, в качестве примера можно рассмотреть наиболее известный проект «Арктик-СПГ-2».

С этой целью исследуем простой круговой маршрут между двумя портами отправки $P_{\text{отпр}}$ и получения $P_{\text{получ}}$, на котором работает флот судов-газовозов вместимостью V_i и общим количеством N_v. Часть маршрута между $P_{\text{отпр}}$ и $P_{\text{получ}}$ от некоторых пунктов P_1 и P_2 требует ледовой проводки, выполняемой ледоколами I_j общим количеством N_i. В данном случае предполагается, что ледовое сопровождение осуществляется лишь в одной зоне акватории, что не ограничивает общности.

Круговой маршрут газовозов в этом случае состоит из шести участков, два из которых (второй и пятый) совокупно образуют круговой маршрут ледоколов, осуществляющих проводку одного судна в прямом или обратном направлении. Конфигурация модели приведена на рис. 1. Зеленым цветом на рисунке показан условный круговой маршрут газовозов между портами отправки и доставки, синим — выделены маршруты ледоколов. Состояние рейдов для временной стоянки судов, газовозов и ледоколов обозначено квадратами соответствующего цвета. Красными стрелками условно показано описанное раннее взаимодействие судов и ледоколов, обуславливающее начало движение пары «ледокол – судно».

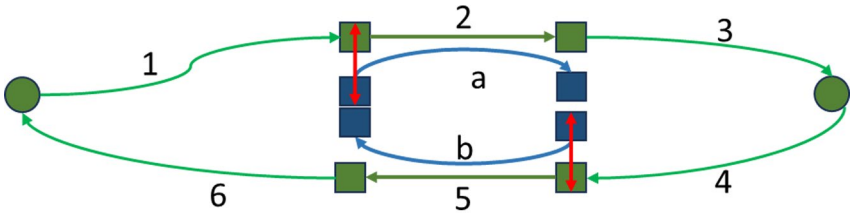


Рис. 1. Круговые маршруты судов и ледоколов
Fig. 1. Circular Routes of Vessels and Icebreakers

Если газовоз подходит к пункту начала ледовой части маршрута с той или другой стороны, он формирует заявку на ледокольную проводку. Если в этом пункте имеется ледокол, то он обслуживает эту заявку, беря судно под сопровождение до противоположного конца маршрута. Если свободные ледоколы отсутствуют, то газовоз становится в очередь на рейде, ожидая прибытия первого ледокола. Освободившийся после проводки ледокол становится в очередь на рейде конечного пункта проводки. При наличии судна для обратной проводки первый ледокол из этой очереди берет судно под проводку. Для удобства моделирования выполним развертку круговой структуры маршрутов, указанных на рис. 1, в линейную структуру (вектор), приведенную на рис. 2.

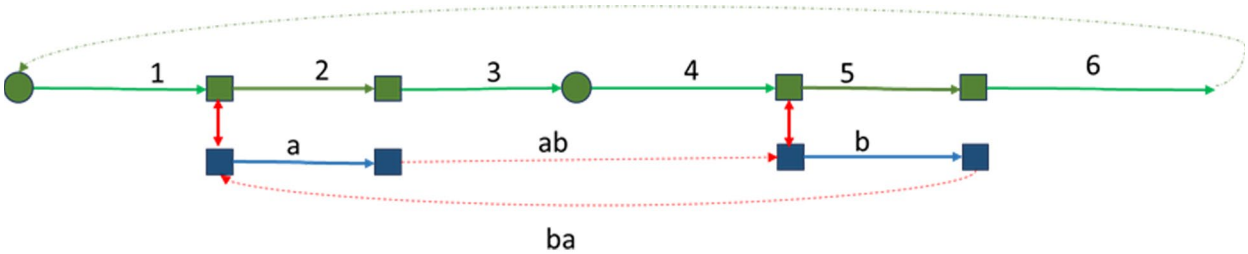


Рис. 2. Линейное представление системы маршрутов судов и ледоколов
Fig. 2. Linear Representation of the Vessel and Icebreaker Route System

Далее для построения модели перенесем эту структуру на дискретное рабочее поле. Например, имеем схему маршрутов с характеристиками, приведенными в табл. 1, в которой длины и координаты характерных точек участков указаны в условных дискретах.

Таблица 1

Характеристики системы маршрутов

Table 1

Route System Characteristics

Наименование	Участок	Длина	Начало	Конец
Участок от порта погрузки до начала ледовой проводки	1	5	1	5
Участок ледовой проводки в прямом направлении	2	6	6	11
Участок от конца ледовой проводки до порта выгрузки	3	7	12	18
Участок от порта выгрузки ло начала ледовой проводки	4	8	19	26
Участок ледовой проводки в обратном направлении	5	7	27	33
Участок от конца ледовой проводки до порта погрузки	6	4	34	37
Длина кругового маршрута танкерного флота	–	37	–	
Участок ледовой проводки в прямом направлении	a	6	6	11
Участок ледовой проводки в обратном направлении	b	7	27	33
Длина кругового маршрута танкерного флота	–	13	–	

Дискретный вектор, соответствующий этой конфигурации маршрутов, приведен на рис. 3, на котором показано состояние системы маршрутов, когда на выходе из 1-го участка, т. е. на подходе к части прямого маршрута с ледовой проводкой, соответствующей 2-му участку маршрута танкеров и участку *a* маршрута ледоколов, находится судно v_1, на выходе обратного участка *b* маршрута ледоколов, т. е. на подходе к той же части маршрута с ледовой проводкой, находится ледокол i_1. Такая же ситуация (симметрично обратная) наблюдается у входа в обратную часть маршрута ледовой проводки с газовозом v_2 и ледоколом i_2.

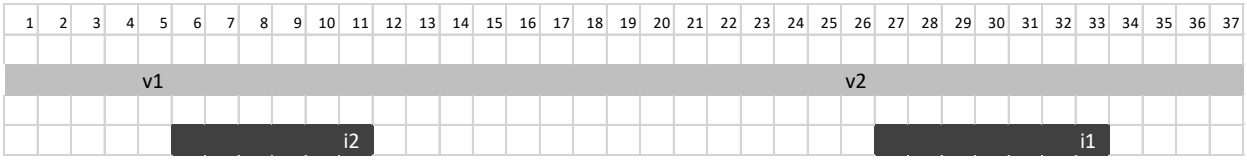


Рис. 3. Дискретное рабочее поле с представлением системы маршрутов рассматриваемого примера
Fig. 3. Discrete Operational Field Showing the Route System in the Example under Consideration

Левому и правому концам маршрута ледовой проводки сопоставим два стека, в которых будут находиться танкеры и ледоколы, подошедшие к данному моменту в соответствующие пунктом маршрута и вставшие в очередь на рейде. Пример маршрута со стеками, отображающими состояние конечных пунктов ледовой проводки, приведен на рис. 4.

На вход стека, соответствующего левому концу маршрута, поступают танкеры, следующие из пункта отправки к началу участка ледовой проводки, и ледоколы, завершившие проводку в обратном направлении. На вход левого конца поступают танкеры, возвращающиеся из пункта доставки к началу проводки в обратном направлении, и ледоколы, завершившие проводку в прямом направлении.

Ледоколам и танкерам в каждом стеке соответствуют отдельные очереди, в которые помещаются подходящие в пункт суда соответствующего типа. Очередь и количество находящихся в ней судов, контролируются идентификаторами судов. Поступление танкера и ледокола увеличивает длину очереди на единицу. Если после постановки танкеров и ледоколов на рейд в очереди оказывается оба типа судов, то первый в очереди танкер и первый в очереди ледокол образуют

пары для проводки. Каждое судно из этой пары выводится в начало соответствующего маршрута, при этом длина очередей уменьшается на единицу. Если для танкера или ледокола пары на ледовую проводку не находится, то они остаются ожидать на рейде. После обработки всех судов на входах рейдов выполняется циклический сдвиг всех судов на всех маршрутах на один дискрет, моделирующий их перемещение за единицу модельного времени.

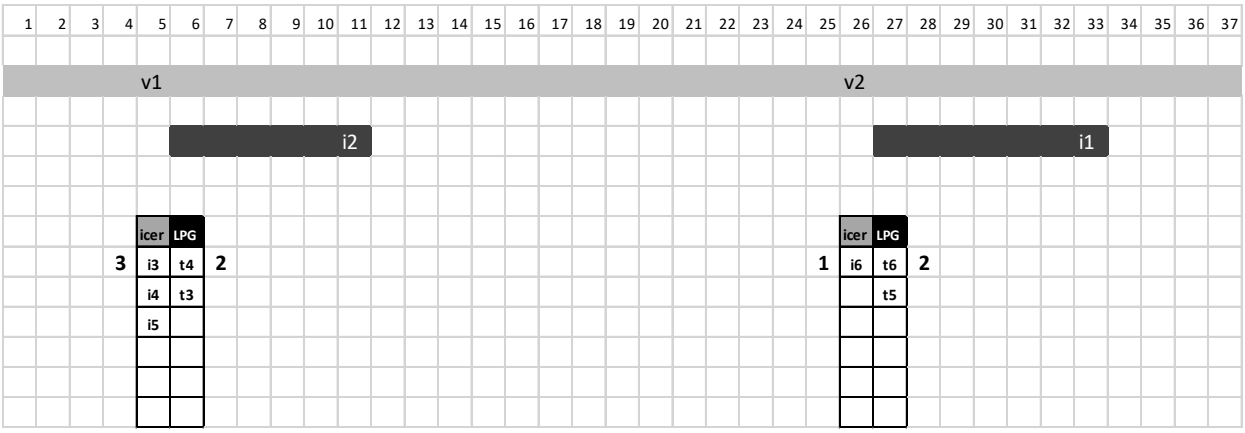


Рис. 4. Состояние маршрута и стеков
Fig. 4. Route and Stack States

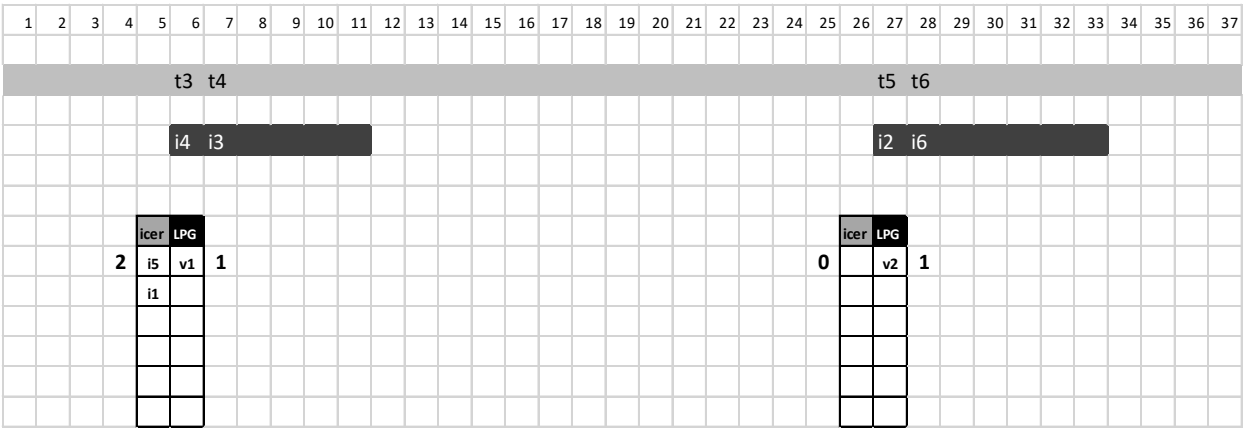


Рис. 5. Фрагмент работы алгоритма
Fig. 5. Fragment of the Algorithm Execution

На рис. 5 показан фрагмент рабочих компонент дискретного вектора модели в ходе моделирования. Из этого рисунка видно, что на участке ледовой проводки в прямом направлении находятся две пары: танкер t_3 в сопровождении ледокола i_4 и танкер t_4 в сопровождении ледокола i_3. На рейде в начале этого участка находятся два ледокола: i_5 и i_1, а также судно v_1. На участке ледовой проводки в обратном направлении находятся две пары: танкер t_5 в сопровождении ледокола i_2 и танкер t_6 в сопровождении ледокола i_6.

Результаты (Results)

Из ранее изложенного очевидно, что составление циклического и разомкнутого описания системы маршрутов является несложной, но крайне трудоемкой с практической точки зрения задачей. Для автоматизации ее решения разработан соответствующий алгоритм, исходными данными которого является графическое изображение системы маршрутов на рабочем поле (рис. 6).

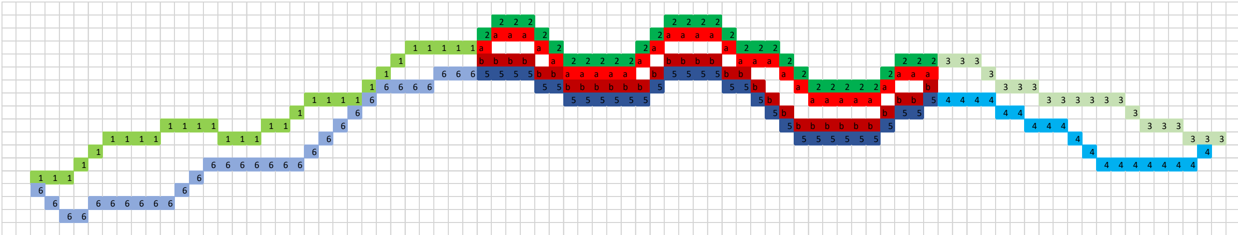


Рис. 6. Пример графического представления системы маршрутов
Fig. 6. Example Graphical Representation of the Route System

Задав координаты каждого отдельного участка маршрута, можно с помощью известного волнового алгоритма распространять волну по всем входящим в него дискретам, фиксируя каждое последовательное перемещение между смежными ими в списке реальных путевых координат. Фиксация конца каждого участка позволяет одновременно формировать как покоординатное описание всех маршрутов, так и координаты характерных точек, необходимых для построения дискретного вектора, пример которого был приведен в табл. 1. В нижней части рис. 7 показана «тень» распространения волны при формировании указанных массивов информации.

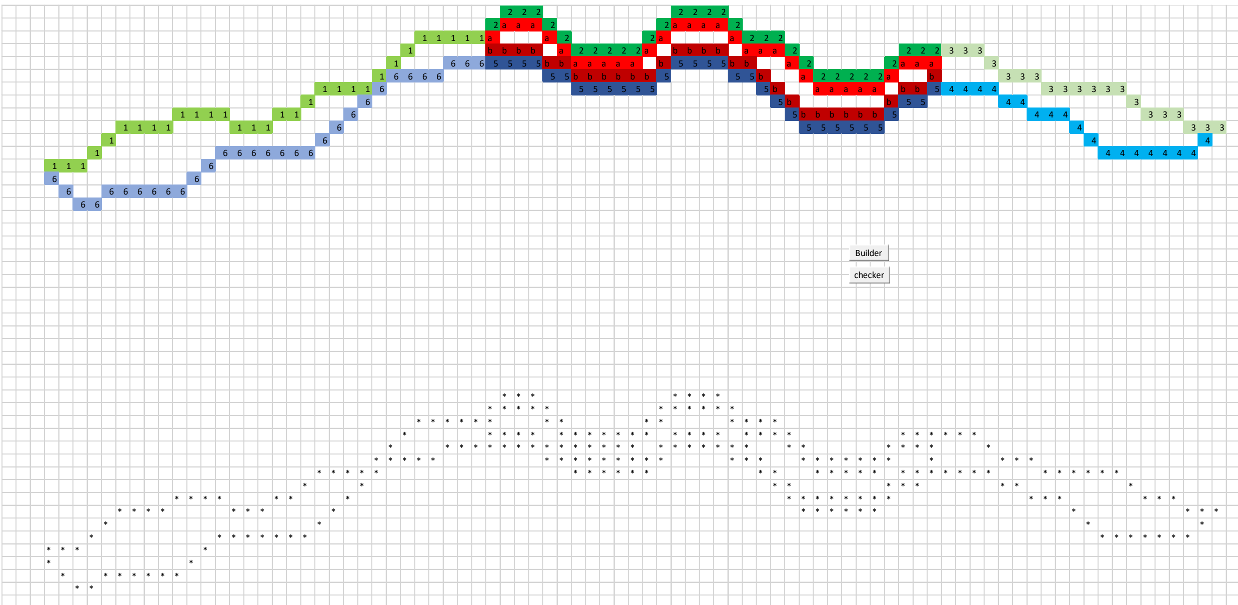


Рис. 7. Исходное представление системы маршрутов и тень распространения волны
Fig. 7. Initial Route System Representation and Wave Propagation Shadow

Полученное изображение в основном используется для визуального контроля, основным результатом которого является построение полного покоординатного описания всех маршрутов (рис. 8).

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
18	18	18	17	16	15	15	15	15	14	14	14	14	15	15	15	14	14	13	12	12	12	12	11	10	9	8	8	8	8	8	7	6	6	6	7	8	9	9	9	9	9	8	7	6	6	6	6	7	8
4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53
																															8	7	7	7	8	9	10	10	10	10	10	9	8	7	7	7	7	8	9
																															35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53

Рис. 8. Часть покоординатного описания маршрутов
Fig. 8. Fragment of the Coordinate-Based Route Description

Полученные координаты позволяют визуализировать полученное описание, что позволяет путем сравнения избежать ошибок и противоречивости данных на начальном этапе (рис. 9).

Рис. 9. Контрольное построение системы маршрутов по описанию
Fig. 9. Verification Reconstruction of the Route System Based on the Description

В случае отсутствия ошибок построенное параллельно в ходе этого процесса описание дискретного вектора считается корректным и может быть использовано в качестве основы построенной модели (табл. 2).

Таблица 2

Реальные характеристики системы маршрутов

Table 2

Actual Route System Characteristics

x	y	x	y	L	beg	end
18	4	8	34	31	1	31
7	35	9	66	32	32	63
9	67	15	86	20	64	83
16	85	12	67	19	84	102
12	66	10	35	32	103	134
10	34	19	5	31	135	165
				165		
8	35	10	66	32	32	63
11	66	9	35	32	103	134
				64		

Иными словами, табл. 2 является конкретным вариантом общего описания, представленного в табл. 1.

Обсуждение (Discussion)

Система маршрутов грузовых судов и ледоколов составляет единую инфраструктуру логистической системы поставки. Ее эксплуатационные характеристики зависят от количества и пространственного расположения флота, двигающегося по указанным маршрутам. Именно моделирование взаимодействия портов, грузовых судов и ледоколов составляет цель отдельного эксперимента, поскольку любая имитационная модель методологически является средством анализа.

Синтез в данном контексте составляет подбор оптимального соотношения численности и состава грузового и ледокольного флота. Он может быть выполнен целенаправленным подбором параметров моделируемой системы, оптимальность которых оценивается по характеристикам поведения модели в ходе последовательности экспериментов.

Все операции моделирования совершаются с компонентами дискретного вектора, состояние которого в каждый момент времени может быть отражено с целью отладки и совершенствования алгоритмов работы моделей. С точки зрения пользователя возможно больший интерес представляет перемещение флота в модельном эксперименте по двумерному дискретному полю, показанному на рис. 6–9. Для этого в модели предусмотрена системная утилита отображения состояния дискретного вектора модели в соответствующее дискретное поле, по мере необходимости отображаемое динамической экранной формой (рис. 10). Полученная таким образом динамическая картина фиксируется в процессе моделирования как видеофайл, доступный для дальнейшего просмотра в целях анализа.

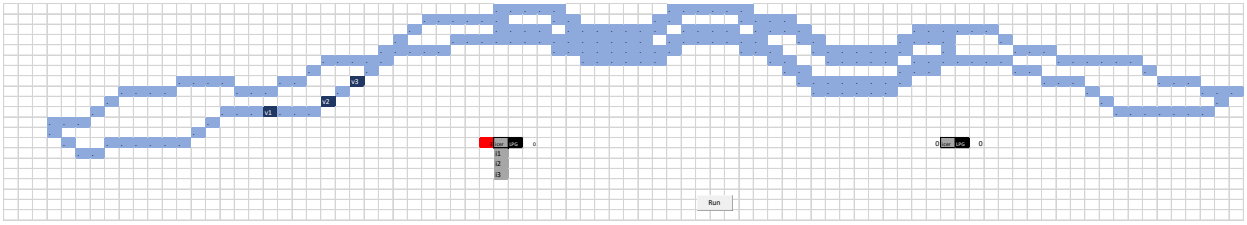


Рис. 10. Пример динамической экранной формы в ходе модельного эксперимента
Fig. 10. Example Dynamic Screen Form during the Simulation Experiment

Движение всех судов по маршрутам отображается перемещениями в дискретном рабочем поле. Каждый дискрет по принципу построения модели соответствует пространственному перемещению, выполняемому за единицу времени. В то же время скорость перемещения в той или иной позиции зависит от навигационной обстановки в области акватории, которую отображает тот или иной дискрет, и, таким образом, может быть различной. В связи с этим соответствующие смежным дискретам точки пространства могут быть удалены друг от друга на различные расстояния.

Изображаемый в модели последовательностью смежных дискреты маршрут в физическом пространстве представляет собой ломаную линию, соединяющую между собой центры прямоугольных областей, соответствующих смежным дискретам. Таким образом, различную скорость перемещения в физическом пространстве можно учесть заданием различного масштаба каждого дискреты, что не представляет собой методической сложности. Безусловно, это не позволяет задавать индивидуальную скорость отдельных судов в одном дискрете, но не является существенным недостатком, поскольку под ледовой проводкой индивидуальная скорость устанавливается переменной скоростью ледокола, а в остальных случаях варьируется в зависимости от навигационных условий для танкера более-менее единым образом.

Значимыми конечными характеристиками варианта, моделируемого в ходе одного эксперимента и используемого для их сравнения, является время ожидания судов обоих типов в тех или иных пунктах маршрутов, длина соответствующих очередей и время круговых рейсов, увеличивающиеся при несбалансированной провозной способности флота.

Заключение (Conclusion)

Проведенное исследование подтверждает актуальность и методическую состоятельность разработанного подхода к имитационному моделированию работы линейных судов ледового класса в условиях частичной ледокольной проводки. Предложенная модель, основанная на дискретном векторном представлении системы маршрутов, позволяет адекватно формализовать сложное взаимодействие грузового и ледокольного флотов, портовых терминалов и навигационной обстановки.

Основным научно-практическим результатом работы является алгоритм автоматизированного построения дискретной модели маршрутов на основе их графического представления. Использование данного волнового алгоритма для генерации покоординатного описания всей логистической цепи позволяет существенно снизить трудоемкость подготовки исходных данных для моделирования и минимизировать риски ошибок ручного ввода. Полученное формализованное описание системы служит универсальной основой для проведения многовариантных имитационных экспериментов.

Рассмотренная модель предназначена для решения задач синтеза и анализа транспортно-логистической системы арктических поставок. Предполагается, что она позволяет достаточно достоверно оценивать ключевые эксплуатационные показатели, такие как время цикла рейса газовозов, длину очередей и время ожидания судов в точках формирования караванов, загрузку линейного ледокольного флота, а также общую провозную способность рассматриваемой системы.

Сравнительный анализ различных сценариев (вариация количества судов и ледоколов, характеристик маршрутов, режимов скорости) позволяет количественно обосновывать решения по составу флота и организации проводки, направленные на обеспечение регулярности и экономической эффективности перевозок в условиях высокой неопределенности ледовой обстановки.

Таким образом, представляется, что разработанная методика и алгоритмический инструментарий поддерживают решение прикладной задачи повышения обоснованности стратегических и оперативных решений, обеспечивая необходимый уровень аналитической поддержки для создания устойчивых и экономически эффективных логистических цепочек в Арктической зоне Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Апполонов Е. М.* Ледовая прочность судов, предназначенных для круглогодичной арктической навигации : монография / Е. М. Апполонов. — СПб.: СПбГМТУ, 2016. — 287 с.

2. Coburn, J. L. A Rational Basis for the Selection of the Ice Strengthening Criteria for Ships : Tech. Rep. SSC-309 / J. L. Coburn, F. W. DeBord, J. B. Montgomery [et al.]; Ship Structure Committee. — Washington, D. C. : SSC, 1981.

3. Lee, S. G., J.S. Lee, Y. H. Baek, J. K. Paik, and B. J. Kim. “Structural Safety Assessment in Membrane-Type CCS in LNGC under Iceberg Collisions.” *International Conference on Ship and Offshore Technology: Ice Class Vessels,* 28–29 Sept. 2009, Busan, Korea.

4. Correlation between bow ice loads and operational responses during ice navigation in the Weddell Sea / A. Bekker, L. Lu, C. M. van Zijl, J.-J. Matthee, P. Kujala // Proceedings of the 25th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 9–13, 2019 Delft, The Netherlands: Delft University of Technology, 2019.

5. *Goerlandt F.* A framework for risk analysis of maritime transportation systems: A case study for oil spill from tankers in a ship–ship collision / F. Goerlandt, J. Montewka // Safety Science. — 2015. — Vol. 76. — Pp. 42–66. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.02.009.

6. Predicting ice-induced load amplitudes on ship bow conditional on ice thickness and ship speed in the Baltic Sea / M. Kotilainen, J. Vanhatalo, M. Suominen, P. Kujala // Cold Regions Science and Technology. — 2017. — Vol. 135. — Pp. 116–126. DOI: 10.1016/j.coldregions.2016.12.006.

7. Solitary flexural–gravity waves in three dimensions / O. Trichtchenko, E. I. Părău, J-M. Vanden-Broeck, P. Milewski // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. — 2018. — Vol. 376. Is. 2129. — Pp. 20170345. DOI: 10.1098/rsta.2017.0345.

8. Review of risk-based design for ice-class ships / P. Kujala, F. Goerlandt, B. Way, D. Smith, M. Yang, F. Khan, B. Veitch // Marine Structures. — 2019. — Vol. 63. — Pp. 181–195. DOI: 10.1016/j.marstruc.2018.09.008.

9. *Киселев В. С.* Имитационное моделирование работы шельфовых сооружений с танкерами-челноками при отгрузке нефтепродуктов в условиях Крайнего Севера / В. С. Киселев // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 46–56. EDN DXMEWV. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-46-56.

10. Simulation model for the North Sea Route transit time estimation / A. L. Kuznetsov, A. V. Kirichenko, V. S. Kiselev, A. D. Semenov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2020. — Vol. 539. — Is. 1. — Pp. 012019. DOI: 10.1088/1755-1315/539/1/012019.

11. Формирование логико-информационной структуры имитационной модели ледовых операций линейных ледоколов / В. С. Киселев, А. В. Кириченко, А. Л. Кузнецов, Ю. Д. Кравец // Транспортное дело России. — 2019. — № 6. — С. 93–98. EDN EXTODS.

12. Технико-экономическое обоснование технологических процессов морских контейнерных терминалов / А. Л. Кузнецов, Е. М. Рогова, А. В. Кириченко, О. В. Соляков. — Москва : Моркнига, 2022. —223 с.

13. *Кузнецов А. Л.* Алгоритм построения произвольного маршрута на дискретной плоскости и его покоординатное описание / А. Л. Кузнецов, В. Ю. Грызлов, А. Уами // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 391–402. 10.21821/2309-5180-2024-16-3-391-402.

REFERENCES

1. Appolonov, E. M. *Ledovaya prochnost' sudov, prednaznachennykh dlya kruglogodichnoy arkticheskoy navigatsii : monografiya.* SPb: SPbGMTU, 2016: 287.

2. Coburn, J. L., et al. *A Rational Basis for the Selection of Ice Strengthening Criteria for Ships*. Ship Structure Committee, 1981. SSC-309. Defense Technical Information Center.

3. Lee, S.G., J.S. Lee, Y.H. Baek, J.K. Paik, and B.J. Kim. "Structural Safety Assessment in Membrane-Type CCS in LNGC under Iceberg Collisions." *International Conference on Ship and Offshore Technology: Ice Class Vessels*, 28-29 Sept. 2009, Busan, Korea

4. Bekker, A., P. Kujala et al. "Correlation between bow ice loads and operational responses during ice navigation in the Weddell Sea." *Proceedings of the 25th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 9-13, 2019* Delft, The Netherlands: Delft University of Technology, 2019.

5. Goerlandt, F. and J. Montewka. "A framework for risk analysis of maritime transportation systems: A case study for oil spill from tankers in a ship–ship collision." *Safety Science* 76 (2015): 42–66. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.02.009.

6. Kotilainen, M., J. Vanhatalo, M. Suominen and P. Kujala. "Predicting ice-induced load amplitudes on ship bow conditional on ice thickness and ship speed in the Baltic Sea." *Cold Regions Science and Technology* 135 (2017): 116–126. DOI: 10.1016/j.coldregions.2016.12.006.

7. Trichtchenko, O., E. I. Părău, J-M. Vanden-Broeck and P. Milewski. "Solitary flexural–gravity waves in three dimensions." *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 376.2129 (2018): 20170345. DOI: 10.1098/rsta.2017.0345.

8. Kujala, P., B. Veitch et al. "Review of risk-based design for ice-class ships." *Marine Structures* 63 (2019): 181–195. DOI: 10.1016/j.marstruc.2018.09.008.

9. Kiselev, V. S. "Simulation of the work of shelf constructions with shuttle tankers during shipping of oil products in the far north conditions." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 12.1 (2020): 46–56. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-46-56.

10. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko, V. S. Kiselev and A. D. Semenov. "Simulation model for the North Sea Route transit time estimation." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 539.1 (2020): 012019. DOI: 10.1088/1755-1315/539/1/012019.

11. Kiselev, V. S., et al. "Formirovanie logiko-informacionnoj struktury imitacionnoj modeli ledovyh operacij linejnyh ledokolov" [Formation of the Logical Information Structure of a Simulation Model for Linear Icebreaker Ice Operations]. *Transportnoe delo Rossii*, no. 6, 2019, pp. 93–98.

12. Kuznetsov, A. L., E. M. Rogova, A. V. Kirichenko and O. V. Solyakov. *Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie tekhnologicheskikh protsessov morskikh konteynernykh terminalov.* Moskva : «MORKNIGA», 2022: 223.

13. Kuznetsov, A. L., V. Yu. Gryzlov and A. Uami. "Algorithm for constructing an arbitrary route on a discrete plane and its executable description." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.3 (2024): 391–402. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-391-402.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Александр Львович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *thunder1950@yandex.ru*

Кириченко Александр Викторович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *kirichenkoav@gumrf.ru*

Ситов Александр Николаевич —
кандиат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *kaf _pigt@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetzov, Alexandr L. —
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: *thunder1950@yandex.ru*

Kirichenko, Alexandr 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: *kirichenkoav@gumrf.ru*

Sitov, Alexandr V. —
PhD in Technical Sciences, Associated Professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: *kaf _pigt@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 27 февраля 2026г.
Received: Feb 27, 2026.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-394-405 **EDN HTOBDM**

УДК 656.6 (159.9444)

РАЗРАБОТКА СПОСОБА КОНТРОЛЯ ФИЗИЧЕСКОЙ УСТАЛОСТИ МОРЯКОВ

С. В. Козик

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

В работе исследованы различные функциональные состояния психики, включающие два больших класса в зависимости от их влияния на качество деятельности: благоприятные и неблагоприятные. Отмечается, что все неблагоприятные функциональные состояния моряков обозначены одним термином — «усталость», а также, что уровень вероятности допущения ошибок моряками, находящимися в неблагоприятном функциональном состоянии, значительно возрастает. Усталость проявляется в физической, когнитивной и поведенческой сферах деятельности человека. Исследованы особенности перехода физической усталости в другие неблагоприятные функциональные состояния, связанные с изменениями в когнитивной и поведенческой сфере. Отмечается, что контроль и регулирование физической усталости обеспечиваются в первую очередь процессом качественного сна. Выполнено исследование роли сна и его влияние на здоровье и состояние человека, в частности, рассмотрены причины влияния сна на деятельность человека применительно к существующим теориям сна. Рассмотрены основные положения современных теорий сна: энергетическая, информационная, психодинамическая, глимфатическая и висцеральная, включая критерии оценки сна, которыми являются его продолжительность и структура. Исследованы основные параметры сна, такие как эффективность, количество циклов, медленный и быстрый сон. Выполнен обзор методов оценки сна: полисомнография, актиграфия, субъективный метод оценки сна. Сделан вывод о том, что в современных условиях на судне рекомендовано использование субъективного метода, реализуемого с помощью ведения дневника сна. Предложена усовершенствованная форма дневника сна: методика его ведения, анализ содержания, сделаны выводы и даны рекомендации по качеству сна и регулированию физической усталости.

Ключевые слова: функциональное состояние, физическая усталость, эмоциональная усталость, поведенческая усталость, роль сна, параметры качества сна, продолжительность и качество сна, теории сна, дневник сна, медленный сон, актиграфия, состояние усталости, продолжительность и качество сна.

Для цитирования:
Козик С. В. Разработка способа контроля физической усталости моряков / С. В. Козик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 3. 394–405. EDN HTOBDM. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-394-405.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR MONITORING SEAFARERS' PHYSICAL FATIGUE

S. V. Kozik

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

The paper examines various mental functional states, which can be divided into two broad categories depending on their impact on performance: favourable and unfavourable for professional activity. It is noted that all unfavourable functional states in seafarers are commonly referred to by the general term "fatigue", and that the probability of errors made by seafarers in an unfavourable functional state increases significantly. Fatigue manifests itself in the physical, cognitive, and behavioural domains of human activity. The study examines the transition from physical fatigue to other unfavourable functional states associated with changes in the cognitive and behavioural domains. It is noted that the monitoring and regulation of physical fatigue are primarily ensured by good-quality sleep. The role of sleep and its impact on human health and condition are analysed, in particular

the reasons for the influence of sleep on human activity in relation to existing theories of sleep. The main provisions of modern theories of sleep are considered: energy conservation, information-processing, psychodynamic, glymphatic, and visceral theories, including sleep assessment criteria such as duration and structure. The main sleep parameters, including sleep efficiency, the number of sleep cycles, slow-wave sleep, and REM sleep, are analysed. The paper provides an overview of sleep assessment methods: polysomnography, actigraphy, and subjective sleep assessment. It is concluded that, under current shipboard conditions, the use of a subjective method implemented through a sleep diary is recommended. An improved form of a sleep diary is proposed, including the procedure for keeping it and analysing its content; conclusions are drawn and recommendations are provided on sleep quality and the regulation of physical fatigue.

Keywords: functional state, physical fatigue, emotional fatigue, behavioural fatigue, role of sleep, sleep quality parameters, sleep duration and quality, theories of sleep, sleep diary, slow-wave sleep, actigraphy, fatigue state.

For citation:
Kozik, Sergey V. "Development of a method for monitoring seafarers' physical fatigue." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.3 (2026): 394–405. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-394-405.

Введение (Introduction)

Ввиду серьезности последствий деятельности моряков, находящихся в состоянии усталости, необходимо обеспечить контроль за данным состоянием. Усталость наблюдается в трех областях проявления личности: физической, когнитивной и поведенческой. Каждая из них имеет свои закономерности по динамике и причинам изменения состояния, последствиям влияния на поведения человека в целом, а также способам корректировки неблагоприятного состояния. Доступных рекомендаций по управлению состоянием в целом и усталостью в частности для моряков практически нет; представлены только общие рекомендации, в которых указаны следующие направления, в соответствии с которыми моряки должны совершенствовать свои знания и навыки самостоятельно путем проб и ошибок[1, 2]:

- осознавать опасность состояния усталости;
- делать все возможное, чтобы приступить к дежурству в состоянии, пригодном для исполнения служебных обязанностей, обеспечивающим безопасность судна на протяжении всего времени;
- знать меры противодействия наступлению состояния усталости, формировать личную стратегию по устранению последствий усталости;
- знать способы определения состояния усталости у себя и других;
- сообщать об опасностях, связанных с усталостью и риском совершить ошибки, которые влияют на безопасность, в соответствии с принятыми в компании процедурами, обеспечивающими отсутствие последствий таких сообщений;
- выполнять наблюдение и поиск подходящего лечения для любых проблем со здоровьем, которые могут оказать влияние на их пригодность к работе;
- использовать достаточное количество времени сна;
- осуществлять мониторинг и эффективное управление продолжительностью сна.

По каждому из этих направлений возникает вопрос: *как это выполнить?* На данный момент этот вопрос остается риторическим, тем более что люди плохо оценивают собственный уровень усталости (работоспособности) и способности принимать решение.

Наиболее конструктивными являются рекомендации по управлению физической усталостью, которая проявляется в ухудшении здоровья, потере контроля за телесными движениями (нарушение психомоторики), непроизвольной потребности сна. Основной рекомендацией по управлению физической усталостью является использование не только достаточного количества (продолжительности) сна, но и его хорошего качества.

[1] Fatigue factors in manning and safety: Resolution A.772(18)// International Maritime Organization, 1993.

[2] Guidance on fatigue mitigation and management: MSC/Circ.1014//International Maritime Organization, 2001.

Цель исследования — разработать способ контроля физической усталости и усовершенствованную форму дневника сна.

Задачи исследования:

- анализ причин влияния сна на здоровье и физическую усталость (работоспособность) моряков;
- обзор теорий сна;
- анализ содержания количественных и качественных характеристик сна;
- обзор методов оценки сна;
- анализ контроля физической усталости по данным дневника сна.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Одной из важнейших составляющих физического благополучия является сон. Самым кратким определением такого состояния, как сон, является следующее: *сон — это состояние, противоположное состоянию бодрствования*. Более развернутое определение: *сон — это периодически возникающее физиологическое состояние, противоположное бодрствованию, которое характеризуется сниженной реакцией на окружающий мир.*

Цикл *сон – бодрствование* является наиболее ярко выраженным примером циркадианного ритма. Циркадианные ритмы — это колебания биологических процессов в течение 24 ч, которые происходят на всех уровнях организации жизни, проявляющиеся в изменении температуры тела, метаболизме, уровне активности и т. д. [1].

Циркадианные ритмы имеют три фундаментальных свойства:

- ритм укладывается в 24-часовой интервал (время, за которое Земля совершает оборот вокруг своей оси);
- ритм отражает динамику изменения явлений окружающей среды, таких как цикл света и темноты, а также ряд других факторов;
- ритм поддерживается вне зависимости от диапазона температур [2].

Существуют также следующие научные определения сна:

- сон — быстро обратимое состояние, для которого характерны отсутствие сознания, сниженные активность и способность реагировать на внешние стимулы [3];
- сон — это особое генетически детерминированное состояние организма теплокровных животных (млекопитающих и птиц), характеризующееся закономерной последовательной сменой определенных полиграфических картин в виде циклов, фаз и стадий [4].

Под полиграфической картиной подразумевается характерное изменение следующих физиологических показателей:

- мышечного тонуса с помощью электромиографии;
- мозговой активности с помощью электроэнцефалографии;
- частоты сокращения сердца и частоты дыхательных движений.

В последнем определении сна отмечаются такие важнейшие его характеристики, как циклы, фазы и стадии. Цикл сна взрослого человека — это полуторачасовой период, в течение которого спящий последовательно проходит четыре стадии, начиная от дремоты (стадия 1), легкого сна (стадия 2) и заканчивая наиболее глубоким, так называемым «дельта-сном» (стадия 3 — умеренно глубокий, стадия 4 — глубокий сон) (*Non-Rapid Eye Movement* (NREM)), составляющие в сумме фазу обычного (медленного, медленно-волнового) сна, которая затем резко сменяется фазой парадоксального (быстрого) сна (*Rapid Eye Movement* (REM)). В фазе быстрого сна человек видит сны. После окончания этой фазы начинается новый цикл сна либо человек пробуждается.

За ночь человек «проходит» 4–6 циклов сна, которые неодинаковы по своей структуре: в первую половину ночи преобладает глубокий дельта-сон, под утро — легкий сон (стадия 2) и фаза быстрого сна (рис. 1).

Внешние проявления сна у млекопитающих включают снижение подвижности тела, характерную позу, повышение порога чувствительности к внешним раздражителям, закрытие глаз и обратимость данного состояния.

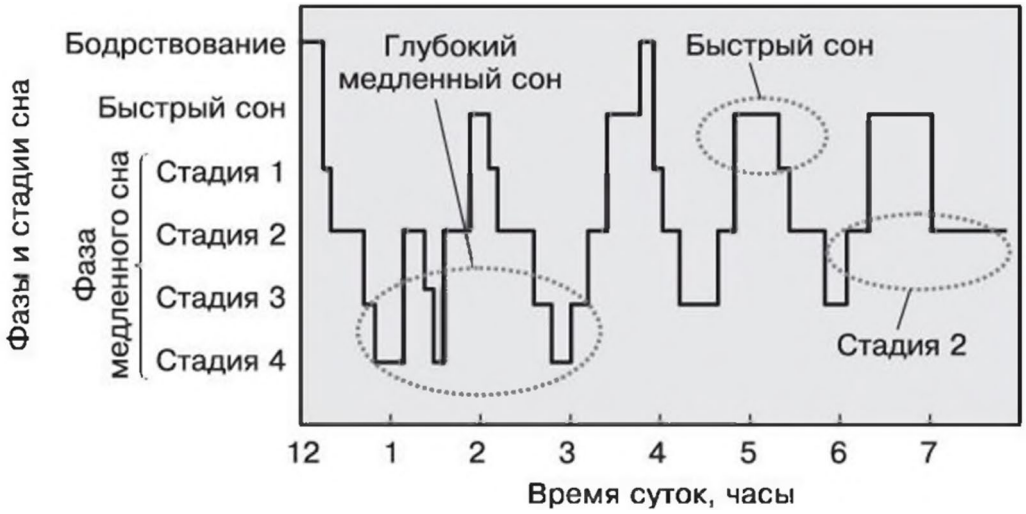


Рис. 1. Циклы, фазы и стадии ночного сна человека
Fig. 1. Cycles, Phases, and Stages of Human Nocturnal Sleep

Рассматривая особенности состояния «сон», следует охарактеризовать противоположное состояние — «бодрствование», которое является состоянием психики, характеризующимся достаточно высоким уровнем электрической активности мозга, свойственным активному взаимодействию человека с внешним миром и выраженным в целенаправленном поведении. У человека важнейшими признаками бодрствования являются *сознание* и *мышление*, у животных — условно-рефлекторная деятельность.

Различают следующие уровни бодрствования: крайний уровень напряжения, активное бодрствование, спокойное бодрствование. Каждый уровень бодрствования различается комплексом вегетативных, моторных и электроэнцефалографических показателей (полиграфической картиной). Только в состоянии бодрствования человек может наилучшим образом принимать и перерабатывать информацию, вызывать в памяти нужные избирательные системы связей, программировать и осуществлять контроль над деятельностью, корригировать ошибки, сохранять выбранную направленность деятельности.

Качество сна оказывает существенное влияние на здоровье человека. Этот факт подтвержден в многочисленных исследованиях [5–7]. В целом влияние сна на процессы, происходящие в организме человека и его здоровье, показано на рис. 2. Ответ на вопрос о том, почему качество сна оказывает значительное влияние на здоровье и состояния человека, дан в существующих теориях сна.

В научной литературе [8] представлены следующие теории сна:

1. *Энергетическая* (компенсаторно-восстановительная) теория сна, которая утверждает, что во время сна восстанавливается та энергия, которая затратилась при бодрствовании

2. *Информационная* теория утверждает, что сон возникает вследствие угнетения информации, поступающей к отделам мозга и это активирует тормозные структуры. Мозг отдыхает от переизбытка информации от окружающего мира для переработки информации

3. *Психодинамическая теория* — рассматривает сон как защитный психический механизм через отражение в нем ситуаций, произошедших во время бодрствования.

4. *Глимфатическая теория сна.* Основные положения концепции «глимфатической системы» мозга были сформулированы в 2012 г. Дж. Иллифф и М. Недергаард [9–11]. Свое название система получила благодаря клеткам глии, из которых она образована. Уникальность этой системы в том, что все артериолы, капилляры и вены мозга плотно, без просветов, окружены слоем астроглиальных отростков. Между отростками и стенкой сосуда остается небольшое пространство, по которому движется жидкость, через которую происходит удаление растворимых белков и метаболитов из мозга.

Рис. 2. Влияние сна для здоровья организма
Fig. 2. Effects of Sleep on Human Health

Функционирование глимфатической системы в упрощенном виде описывается следующим образом: во время бодрствования клетки глии плотно примыкают к аксонам и телам нейронов, оплетают мельчайшие капилляры, оставляя очень небольшое пространство. Система практически не работает. В глубоком физиологическом сне глимфатическая система повышает свою активность в 10 раз, глиозные клетки сжимаются больше, чем на половину своего объема. Пространство между сжавшейся глией и нейронами серьезно увеличивается (до 20%) и это освобождается место для жидкости, начинающая интенсивно протекать через ткани мозга. Именно во время глубокого сна (3-я и 4-я фазы сна) жидкость выводит продукты метаболизма в глубокие лимфоузлы шеи. Движение жидкости обеспечивает пульсация сосудов и волнообразным сжатием глиозных клеток. Эта макроскопическая система циркуляции жидкости в норме полностью обеспечивает обмен, адекватный интенсивному метаболизму мозга. Недостаток сна, отсутствие фазы медленного сна приводит к зашлаковыванию мозга продуктами метаболизма, что приводит в итоге к нарушению работы всей нервной системы организма.

5. *Висцеральная теория сна.* Автором теории является И. Н. Пигарев [12, 13]. В основе этой теории предположение, что во время сна центральные отделы нервной системы, включая кору мозга, переключаются с анализа информации, поступающей из внешней среды, на анализ потока сигналов от висцеральных (внутренних) систем организма, осуществляя восстановление и оптимизацию их работы. Согласно этой теории, несоответствие текущих параметров, отражающих состояние любой висцеральной системы и генетически заданных, будет вызывать ощущение усталости (давления сна) и если окружающая обстановка не позволяет перейти ко сну, сон может наступить лишь в некоторых корковых зонах при сохранении поведенческой активности. Поведенческие задачи, не требующие вовлечения высших корковых ресурсов, могут нормально реализовываться даже в условиях, когда часть корковых зон уже спит. Однако в ситуациях, когда всю мощь коры мозга необходимо задействовать для принятия сложных решений, локальный сон может привести к серьезным последствиям. Поэтому появление локального сна в периоды бодрствования является признаком наличия скрытых проблем в работе внутренних органов человека.

Результаты (Results)

При оценке качества сна используются следующие критерии:

1. *Продолжительность сна*. Для оценки сна по этому критерию, в зависимости от используемого метода, рассчитываются пять числовых показателей, приведенных в табл. 1.

Таблица 1

Числовые показатели продолжительности сна

Table 1

Quantitative Indicators of Sleep Duration

№ п/п.	Показатель	Описание показателя	Нормируемое значение
1	Время нахождения в кровати, мин	Интервал времени от момента отхода ко сну до момента пробуждения	420
2	Латентность ко сну, мин	Интервал времени от отхода ко сну до засыпания	≤ 20
3	Пробуждения после засыпания, мин	Длительность пробуждений за период времени от засыпания до пробуждения	10
4	Эффективность сна, %	1-2-3/1 · 100	≥ 80
5	Дневной сон, мин	Длительность дневного сна, преобладание монофазного или полифазного характера сна	≤ 30

2. *Структура сна*. Для оценки сна по этому критерию, в зависимости от используемого метода, рассчитываются числовые показателей, содержание которых представлены в табл. 2.

Таблица 2

Числовые показатель структуры сна

Table 2

Quantitative Indicators of Sleep Structure

№ п/п.	Показатель	Описание показателя	Нормируемое значение
1	Продолжительность фазы быстрого сна, %	Суммарное время быстрого сна по отношению ко всему сну	45
2	1-я стадия медленного сна, %	Суммарное время 1-й стадии к продолжительности медленного сна	20
3	2-я стадия медленного сна, %	Суммарное время 2-й стадии к продолжительности медленного сна	70
4	3-я стадия медленного сна, %	Суммарное время 3-й стадии к продолжительности медленного сна	–
5	Число циклов сна	Число циклов *медленный – быстрый* сон	5

3. *Субъективная удовлетворенность качеством сна*. Оценка продолжительности сна и его структур производится самим человеком на основе личного мнения, характеризуя его эффективности и влияние на состояния в период бодрствования.

Для оценки качества сна используются следующие методы.

Полисомнография (ПСГ) — объективный метод оценки сна. Назначается при подозрении на нарушения сна и позволяет наиболее точно оценить характеристики сна. Регистрируются различные физиологические параметры: электроэнцефалограмма, электрокардиограмма, электрооку-лограмма, электромиограмма, параметры дыхания, насыщение крови кислородом. ПСГ является

дорогостоящим и затратным с точки зрения материальных и человеческих ресурсов исследованием, доступен в крупных медицинских центрах и специализированных лабораториях.

Актиграфия — метод для диагностики характеристик сна путем регистрации двигательной активности тела человека по данным трехосевого акселерометра, который позволяет фиксировать: фазы сна, продолжительность сна и его эффективность. Современные запястные актиграфы имеют вид браслета или наручных часов и могут регистрировать данные в течение нескольких недель [14].

Субъективный метод оценки сна — использование различных опросников, которые помогают сориентироваться относительно основных характеристик сна и дневных симптомов, которые возникают при снижении качества сна.

Обсуждение (Discussion)

В настоящее время единственным доступным методом контроля качества сна моряков является субъективный метода оценки сна, который реализуется использованием дневника сна (табл. 3) в сочетании с оценкой его качества с помощью нескольких небольших опросников. Данный подход рекомендован Рекомендациями ИМО по управлению усталостью.

Таблица 3

Дневник сна

Table 3

Sleep Log

Дата (день, месяц (например, 12.01)	Я лег в кровать в (часов, минут):	Я поднялся с кровати в (часов, минут):	Я проспал общее число часов, минут	Качество сна (0–7 баллов) по шкале SQ	Сонливость (0–9 баллов) по шкале KSS	Внешняя оценка усталости (0–7 баллов) по шкале SPC	Категория усталости / Сумма баллов (самооценка усталости)	Примечание (меры контроля усталости при выявлении категории 1 или 2)
1	2	3	4	5	6	7	8	9

При ведении дневника сна морякам предлагается записывать время отхода ко сну и пробуждения, а также продолжительность сна. Если сон в течение суток был несколько раз, то на одну дату необходимо предусмотреть несколько строчек в дневнике.

Разница числовых значений в графах 2 и 3 может не соответствовать значению в графе 4, так как нахождение в кровати не означает, что человек спит. Это связано с длительностью засыпания и пробуждения.

Качество сна определяется по семибалльной шкале (шкала SQ) — графа 5 табл. 3. Градация шкалы имеет следующий вид: 1 балл — высокое качество, 2 балла — хорошее качество, 3 — выше среднего, 4 — среднее качество, 5 — ниже среднего, 6 — низкое качество, 7 — очень низкое качество сна.

Сонливость оценивается в девятибалльной шкале (шкала KSS) Каролинска (The Karolinska Sleepiness Scale), разработанной в Каролинском институте в Швеции, и часто используется в научных целях (графа 6 табл. 3). Градация шкалы имеет следующий вид: 1 балл — полностью внимателен к выполнению служебных обязанностей; 2 балла — внимателен; 3 балла — практически внимателен; 4 — рассеянный; 5 — ни бодрый, ни сонный; 6 — некоторые признаки сонливости;

7 — сонный, но никаких усилий для бодрствования; 8 — сонный, необходимы некоторые усилия для сохранения бодрствования; 9 — очень сонный, необходимы большие усилия для борьбы со сном.

Внешняя оценка усталости оценивается по семибалльной шкале Самн – Перели (шкала SPC) (графа 7 табл. 3). Градация шкалы следующая: 1 балл — полностью бдительный, внимательный; 2 балла — внимательный, но не на пике концентрации внимания; 3 — хорошо, в некотором роде свежий; 4 — немного устал, но не бодрый; 5 — умеренно уставший, расстроенный; 6 — очень усталый, очень сложно концентрировать внимание; 7 — полностью измученный, неспособный функционировать эффективно.

Самооценка усталости (Fatigue Self-Assessment Scale) определяется путем ответа на вопросы:

- о готовности к выполнению работы;
- о самочувствии (усталость);
- о количестве сна;
- о качестве сна;
- о наличии физических и психических признаков усталости (табл. 4).

Таблица 4

Самооценка усталости

Table 4

Fatigue Self-Assessment

Готовность к работе	1	Нет	
Вы уверены, что готовы к работе?	2	Да, но под дополнительным контролем	
	3	Да	
Усталость	1	Очень утомлен, с трудом может сохранять бдительность	
Как Вы чувствуете себя сейчас?	2	Немного устал, требуются усилия, чтобы оставаться начеку	
	3	Достаточно внимателен — бодрствующий	
Количество сна	1	Нет	
Вы спали последние 24 часа?	2	Да, но я не выспался идеально	
	3	Да, у меня идеальное количество сна	
Качество сна	1	Плохое	
Как бы вы оценили качество сна?	2	Среднее	
	3	Хорошее	
Признаки усталости	1 — да	Испытывали ли вы какие-либо физические признаки усталости непосредственно перед или во время этого служебного периода, т. е. микросон	3 — нет
	1 — да	Испытывали ли вы психические признаки усталости непосредственно перед или во время этого служебного периода, т. е. трудности с концентрацией внимания	3 — нет

Каждый из показателей имеет числовую градацию от 1 до 3. Подсчитывается общее число баллов и записывается таблицу. Определяется категория усталости в соответствии со следующим критериями:

- если один или несколько ответов — 1, то ваша категория усталости — 1;
- если один или несколько ответов — 2, то ваша категория усталости — 2;
- если один или несколько ответов — 3, то ваша категория усталости — 3.

Категория усталости записывается в таблицу дневника сна (графа 8 табл. 3). В зависимости от категории усталости сформулированы рекомендуемые действия, содержание которых приведено в табл. 5.

Таблица 5

Рекомендуемые действия в зависимости от категории усталости

Table 5

Recommended Actions by Fatigue Category

Категория	Необходимое действия
1	Как только это станет безопасным, приостановите все критически важные для безопасности задачи, которые было начаты. Доложите своему непосредственному руководителю о состоянии усталости
2	Перед началом вашего служебного периода или началом выполнения поставленных задач или перед продолжением работы над начатой задачей, внедрить меры контроля над усталостью по мере необходимости
3	Следите за признаками усталости; никаких дополнительных мер контроля не требуется

Принятые меры из состава рекомендуемых в табл. 5 указаны в графе 9 табл. 3.

Анализ данных из дневника сна следует проводить в течение семидневного периода. Предлагается установить:

- продолжительность, эффективность и характер сна (полифазный или монофазный);
- влияние полученного сна на самочувствие, усталость (работоспособность);
- сделать вывод о его достаточности для компенсации физической усталости.

При наличии 1-й категории усталости выводы, полученные на основе анализа данных дневника сна, позволяют аргументированно выполнить рекомендацию, содержащуюся в табл. 5: доложить руководителю о состоянии усталости и получить время для полноценного монофазного сна.

Недостатком субъективного метода оценки качества сна, реализованного путем ведения дневника сна, является отсутствие информации о структуре сна: наличии и продолжительности медленного сна, а также числе циклов «медленный – быстрый сон». Как отмечалось ранее, именно в период медленного сна происходит «чистка» головного мозга и восстановление работоспособности внутренних органов, а его отсутствие может существенно снизить работоспособность даже при наличии в целом достаточно продолжительного сна. Устранить этот недостаток можно использованием метода актиграфии, который часто реализуется в фитнес-браслетах и умных часах. Использование таких устройств требует совершенствования их программного обеспечения для учета особенностей деятельности моряков на судне.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы

1. Усталость наблюдается в трех областях проявления личности: физической, когнитивной и поведенческой [15–18]. Управление физической усталостью обеспечивается использованием достаточного количества сна, при этом особое значение имеет не только количество сна (эффективность сна), но и его качество (число циклов «быстрый – медленный сон»).

2. На основе анализа научных исследований [1–7], посвященных влиянию сна и бодрствования на деятельность человека, сделаны заключения о том, что недостаток сна отрицательно влияет в целом на здоровье человека, его работоспособность, адекватность поведения и принимаемые решения; сон успешно регулирует физическую усталость (с развитием физической усталости начинается переход в другие неблагоприятные функциональные состояния, связанные с изменениями в когнитивной и поведенческой сферах).

3. Объяснение причин влияния сна на деятельность человека дано в существующих теориях сна. Следует выделить глимфатическую и висцеральные теории сна. В соответствии с глимфатической теорией в период медленного сна происходит «очистка» мозга от продуктов метаболизма. В соответствии с висцеральной теорией во время сна, в дополнение к автономной нервной системе, центральные отделы нервной системы, включая кору головного мозга, переключаются с анализа информации, поступающей из внешней среды, на анализ потока сигналов от висцеральных (внутренних) систем организма, осуществляя при этом восстановление и оптимизацию их работы.

4. Для характеристики сна используются показатели его эффективность, структуры и субъективной удовлетворенностью сном. Получение числовых значений показателей качества сна осуществляется путем применения методов полисомнографии, актиграфии и субъективного метода. На основе результатов анализа этих методов сделан вывод о том, что в современных условиях плавания судна рекомендовано использовать субъективный метод, реализуемый с помощью ведения дневника сна.

5. Разработана усовершенствованная форма дневника сна, в котором для каждых суток отображаются продолжительность сна, субъективная оценка его полноты, а также влияние на самочувствие. Дневник можно вести в электронном и бумажном виде. Анализ данных дневника сна позволяет аргументированно управлять физической усталостью.

6. Для получения характеристики структуры сна перспективным является использование *метода актиграфии* (фитнес-браслет, умные часы), что позволит регулировать продолжительность медленного сна. Условия и возможность применения этого метода в условиях плавания судна требуют дополнительных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Partch C. L.* Molecular architecture of the mammalian circadian clock / C. L. Partch, C. B. Green, J. S. Takahashi // Trends in Cell Biology. — 2014. — Т. 24. — № 2. — С. 90–99. DOI: 10.1016/j.tcb.2013.07.002.

2. *Mohawk J. A.* Central and Peripheral Circadian Clocks in Mammals / J. A. Mohawk, C. B. Green, J. S. Takahashi // Annual Review of Neuroscience. — 2012. — Vol. 35. Is. Volume 35, 2012. — Pp. 445–462. DOI: 10.1146/annurev-neuro-060909-153128.

3. *Пучкова А. Н.* Исследования обучения во сне: проблемы, достижения и перспективы / А. Н. Пучкова // Журнал неврологии и психиатрии имени С. С. Корсакова. — 2019. — Т. 119. — № 4-2. — С. 8–14. EDN FOBREP. DOI: 10.17116/jnevro20191190428.

4. *Завалко И. М.* Как возникла наука о сне / И. М. Завалко, В. М. Ковальзон // Природа. — 2014. — № 4(1184). — С. 55–63. EDN SENRED.

5. *А. П. А. Форстер* Здоровье сна / А. П. А. Форстер, Э. Й. В. Ван Сомерен, А. И. Пак [и др.] // Уральский медицинский журнал. — 2025. — Т. 24. — № 1. — С. 159–178. EDN VDKZXA. DOI: 10.52420/umj.24.1.159.

6. Взаимосвязь сна и заболеваний сердечно-сосудистой системы / Н. В. Самохин, Ю. Ю. Отставнова, М. М. Степанов, Е. М. Суркичин // Кремлевская медицина. Клинический вестник. — 2025. — № 3. — С. 85–89. EDN GEJAXT. DOI: 10.48612/cgma/149u-zm29-59b7.

7. Sleep-dependent upscaled excitability, saturated neuroplasticity, and modulated cognition in the human brain / M. A. Salehinejad, E. Ghanavati, J. Reinders, J. G. Hengstler, M-F. Kuo, M. A. Nitsche // eLife. 2022. Vol. 11. Pp. e69308. DOI: 10.7554/eLife.69308.

8. *Бегларян Л. А.* Современные теории сна (обзор) / Л. А. Бегларян, И. Л. Привалова // Innova. — 2024. — Т. 10. № 4. — С. 28–33. EDN XFTTYS.

9. *Воронов А. И.* Шизофрения, сон и глимфатическая система головного мозга / А. И. Воронов // Тюменский медицинский журнал — 2017. — Т. 19. — № 1. — С. 41–48. — EDN YPDFQV.

10. A Paravascular Pathway Facilitates CSF Flow Through the Brain Parenchyma and the Clearance of Interstitial Solutes, Including Amyloid β / J. J. Iliff, M. Wang, Y. Liao, B. A. Plogg, W. Peng, G. A. Gundersen, H. Benveniste, G. E. Vates, R. Deane, S. A. Goldman, E. A. Nagelhus, M. Nedergaard // Science Translational Medicine. — 2012. — Vol. 4. — Is. 147. — Pp. 147ra111–147ra111. — DOI: 10.1126/scitranslmed.3003748.

11. The Glymphatic System: A Beginner's Guide / N. A. Jessen, A. S. F. Munk, I. Lundgaard, M. Nedergaard // Neurochemical Research. — 2015. — Vol. 40. — Is. 12. — Pp. 2583–2599. — EDN LVWHHY. DOI: 10.1007/s11064-015-1581-6.

12. *Пигарев И. Н.* Асинхронное развитие сна как вероятная причина снижения когнитивных функций и возникновения ряда патологических состояний, связанных с циклом «сон - бодрствование» / И. Н. Пигарев, М. Л. Пигарева // Эффективная фармакотерапия. — 2014. — № 22. — С. 6–15. EDN SXMXIZ.

13. *Пигарев И. Н.* Висцеральная теория сна / И. Н. Пигарев // Журнал высшей нервной деятельности имени И. П. Павлова. — 2013. — Т. 63. — № 1. — С. 86. EDN PRFIHR. DOI: 10.7868/S0044467713010115.

14. Метод актиграфии для оценки характеристик сна и ритма сон-бодрствование / М. В. Бочкарев, Л. С. Коростовцева, Е. А. Медведева, Ю. В. Свиряев // Профилактическая медицина. — 2019. — Т. 22. — № 2. — С. 95–100. EDN SSKVEK. DOI: 10.17116/profmed20192202195.

15. *Козик С. В.* Психодиагностический подход к оценке усталости моряков / С. В. Козик // Сборник научных статей национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» : сборник статей конференции, Санкт-Петербург, 30 сентября – 20 октября 2024 года. — Санкт-Петербург: Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, 2025. — С. 37–41. EDN QIXIAE.

16. *Козик С. В.* Структурирование терминологического аппарата, используемого при анализе влияния человека на безопасность судоходства / С. В. Козик // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 2. — С. 216–232. EDN KMRRYP. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-216-232.

17. *Козик С. В.* Опыт изучения динамики работоспособности у плавсостава / С. В. Козик // Транспортное дело России. — 2025. — № 4. — С. 72–75. EDN BDAVBV.

18. *Козик С. В.* Анализ проблемы усталости моряков при осуществлении профессиональной деятельности / С. В. Козик // Речной транспорт (XXI век). — 2025. — № 4(116). — С. 48–51. EDN LBMOCF.

REFERENCES

1. Partch, C. L., C. B. Green and J. S. Takahashi. “Molecular architecture of the mammalian circadian clock.” *Trends in Cell Biology* 24.2 (2014): 90–99. DOI: 10.1016/j.tcb.2013.07.002.

2. Mohawk, J. A., C. B. Green and J. S. Takahashi. “Central and Peripheral Circadian Clocks in Mammals.” *Annual Review of Neuroscience* 35.Volume 35, 2012 (2012): 445–462. DOI: 10.1146/annurev-neuro-060909-153128.

3. Puchkova, A. N. “Learning during sleep: pitfalls, advances and promises.” *S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry* 119.4-2 (2019): 8–14. DOI: 10.17116/jnevro20191190428.

4. Zavalko, I. M. and V. M. Koval’zon. “How the science of sleep emerged.” Priroda 4(1184) (2014): 55–63.

5. A. P. A. Vorster, C. L. A. Bassetti et al. “Sleep Health.” *Clinical and Translational Neuroscience* 8.1 (2024). DOI: 10.3390/ctn8010008.

6. Samokhin, N. V., Yu. Yu. Otstavnova, M. M. Stepanov and E. M. Surkichin. “Relationship between sleep and cardiovascular diseases.” *Kremlin Medicine Journal* 3 (2025): 85–89. DOI: 10.48612/cgma/149u-zm29-59b7.

7. Salehinejad, M. A., M. A. Nitsche et al. “Sleep-dependent upscaled excitability, saturated neuroplasticity, and modulated cognition in the human brain.” *eLife* 11 (2022): e69308. DOI: 10.7554/eLife.69308.

8. Beglaryan, L. A. and I. L. Privalova. “Modern sleep theories (review).” *Innova* 10.4 (2024): 28–33.

9. Voronov, A. I. “Schizophrenia, sleep and cns glymphatic system.” *Tyumen Medical Journal* 19.1 (2017): 41–48.

10. Iliff, J. J., M. Nedergaard et al. “A Paravascular Pathway Facilitates CSF Flow Through the Brain Parenchyma and the Clearance of Interstitial Solutes, Including Amyloid β.” *Science Translational Medicine* 4.147 (2012): 147ra111–147ra111. DOI: 10.1126/scitranslmed.3003748.

11. Jessen, N. A., A. S. F. Munk, I. Lundgaard and M. Nedergaard. “The Glymphatic System: A Beginner’s Guide.” *Neurochemical Research* 40.12 (2015): 2583–2599. DOI: 10.1007/s11064-015-1581-6.

12. Pigarev, I. N. and M. L. Pigareva. “Asynchronous development of sleep – a plausible cause of cognitive impairment and a number of pathological conditions related to sleep-wake cycle.” *Effektivnaya farmakoterapiya* 22 (2014): 6–15.

13. Pigarev, I. N. “Vistseral’naya teoriya sna.” *I.P. Pavlov Journal of Higher Nervous Activity* 63.1 (2013): 86. DOI: 10.7868/S0044467713010115.

14. Bochkarev, M. V., L. S. Korostovtseva, E. A. Medvedeva and Yu. V. Sviryaev. “Actigraphy for estimation of the characteristics of sleep and sleep-wake rhythm.” *Russian Journal of Preventive Medicine and Public Health* 22.2 (2019): 95–100. DOI: 10.17116/profmed20192202195.

15. Kozik, S. V. "A psychodiagnostic approach to assessing seafarers fatigue." *Sbornik nauchnykh statey natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava FGBOU VO "GUMRF imeni admirala S. O. Makarova": Sbornik statey konferentsii, Sankt-Peterburg, 30 sentyabrya – 20 oktyabrya 2024 goda.* Sankt-Peterburg: Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2025: 37–41.

16. Kozik, S. V. "Structuring of the terminological apparatus used in the analysis of the influence of the human factor on the safety of navigation." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.2 (2025): 216–232. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-216-232.

17. Kozik, S. V. "The experience of studying the dynamics of working capacity of the crew." *Transport Business in Russia* 4 (2025): 72–75.

18. Kozik, S. V. "The analysis of the problem of fatigue among seafarers during their professional activities." Rechnoy transport (XXI vek) 4(116) (2025): 48–51.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Козик Сергей Викторович —
кандидат военных наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: koserbik@mail.ru, konkurs@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kozik, Sergey V. —
PhD in Military Sciences, Associate Professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg,
198035, Russian Federation
e-mail: koserbik@mail.ru, konkurs@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 17 февраля 2026 г.
Received: Feb. 17, 2026.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-406-423 **EDN JCVMJN**

УДК: 656.614.35

ОЦЕНКА СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ВЕРОЯТНОСТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМОВ ГРУЗООБОРОТА МОРСКИХ ПОРТОВ, СГРУППИРОВАННЫХ ПО БАССЕЙНАМ, НА ОСНОВЕ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

И. В. Зуб, С. А. Фомичев, В. А. Фомичев

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

В статье представлены результаты анализа грузооборота пяти морских бассейнов Российской Федерации за 2021–2024 гг. Анализ деятельности портов и морских бассейнов, выполненный на основе имеющихся статистических данных, позволяет определить тенденцию их перспективного развития, которая зависит как от каботажных грузоперевозок, так и от внешнеэкономических связей. Прогнозирование грузооборота на основе существующих методов позволит морским бассейнам и отдельным портам оптимизировать погрузочно-разгрузочные работы, организационно-технические мероприятия по технической эксплуатации подъемно-транспортного оборудования, координировать направления грузопотоков, а также планировать количество хранящегося на складе груза. Отмечается, что управление данными показателями позволят планировать загрузку складских площадей портов морских бассейнов, своевременно подготавливать судовые партии, что позволит избежать простоев судов под грузовыми операциями. Анализ и прогноз различных видов экономической деятельности осуществляется экспертными оценками, различными математическими методами, которые имеют вероятностный характер. В работе использован метод Хольта – Винтерса, который по результатам анализ дал наиболее точный прогноз. В результате выполненного прогноза грузооборота методом Хольта – Винтерса на 2025 г. проведено сравнение полученных прогнозируемых данных и фактических данных. Для проверки их соответствия или несоответствия выполнен проверочный расчет с использованием встроенной функции в Microsoft Excel и проведено сравнение прогнозируемых и фактических данных на их соответствие или несоответствие. Применение указанных методов прогнозирования позволяют представить анализ грузооборота морских бассейнов для нивелировки конфликтных ситуаций в процессе перевалки грузов и оперативного принятия решений, рационального использования инфраструктуры портов морского бассейна. На основе сравнения рассмотренных методов показано, что полученные на их основе данные по грузооборотам приближены к соответствию с фактическими статистическими данными.

Ключевые слова: грузооборот, морской бассейн, порт, методы прогнозирования, статистические данные, модель, перевалка грузов, портовая инфраструктура, морской транспорт, подъемно-транспортное оборудование, метод Хольта – Винтерса.

Для цитирования:
Зуб И. В. Оценка статистических параметров и вероятностное определение объемов грузооборота морских портов, сгруппированных по бассейнам, на основе прогностических моделей / И. В. Зуб, С. А. Фомичев, В. А. Фомичев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 3. 406–423. EDN JCVMJN. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-406-423.

STATISTICAL PARAMETER ESTIMATION AND PROBABILISTIC FORECASTING OF CARGO TURNOVER AT SEAPORTS GROUPED BY SEA BASIN USING PREDICTIVE MODELS

I. V. Zub, S. A. Fomichev, V. A. Fomichev

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

The article presents the results of an analysis of cargo turnover in five sea basins of the Russian Federation for 2021–2024. The analysis of port and sea basin operations, carried out on the basis of available statistical data,

makes it possible to identify trends in their future development, which depend on both coastal shipping and foreign economic relations. Forecasting cargo turnover using existing methods enables sea basins and individual ports to optimise cargo-handling operations, plan organisational and technical measures for the operation and maintenance of lifting and handling equipment, coordinate cargo flow directions, and determine the amount of cargo to be stored in warehouses. Managing these indicators makes it possible to plan the utilisation of warehouse areas at seaports, prepare vessel consignments in a timely manner, and avoid vessel downtime during cargo operations. The analysis and forecasting of various types of economic activity are carried out using expert assessment and various mathematical methods, which are probabilistic in nature. This study applies the Holt-Winters method, which provided the most accurate forecast based on the results of the analysis. Following the cargo turnover forecast for 2025 obtained using the Holt-Winters method, the predicted values were compared with the actual data. To verify the degree of agreement between the forecast and the actual values, an additional calculation was performed using a built-in Microsoft Excel function. The application of these forecasting methods makes it possible to analyse cargo turnover in sea basins in order to mitigate potential conflicts during cargo transshipment, support prompt decision-making, and ensure the rational use of port infrastructure within each sea basin. The comparison of the methods considered shows that the cargo turnover values obtained using these methods are close to the actual statistical data.

Keywords: cargo turnover, sea basin, seaport, forecasting methods, statistical data, model, cargo transshipment, port infrastructure, maritime transport, lifting and handling equipment, Holt-Winters method.

For citation:
Zub, Igor V., S. A. Fomichev and V. A. Fomichev. “Statistical parameter estimation and probabilistic forecasting of cargo turnover at seaports grouped by sea basin using predictive models” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.3 (2026): 406–423. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-406-423.

Введение (Introduction)

Российская Федерация (РФ) имеет самую протяженную в мире береговую линию и доступ к пяти морским бассейнам. Морские бассейны РФ включают 67 портов, которые являются стратегическими объектами не только регионов, но и страны в целом, что определяет необходимость их развития и совершенствования. Грузооборот морских портов является важной составляющей экономики страны. Исследование грузооборота морских бассейнов РФ за период 2021–2025 гг. демонстрирует устойчивую тенденцию к снижению, которая охватывает все порты независимо от их географического местоположения[1]. Данная ситуация требует всестороннего анализа причин и разработки превентивных мер для обеспечения равномерной загрузки портовой инфраструктуры.

Анализ деятельности портов на основе открытых статистических данных позволяет определить тенденцию их перспективного развития, которая зависит как от каботажных грузоперевозок, так и от внешнеэкономических связей. Если первые зависят от развития регионов, то вторые — от торгово-экономических взаимоотношений с другими странами. Несмотря на рост санкций, Россия не прекращает наращивать транспортировку и перевалку грузов морским транспортом. Оценка существующих вызовов и прогнозирование будущих позволит сформировать программу действий для стратегического планирования развития морской деятельности в целом. Порт как субъект экономической деятельности должен реагировать на изменения политической и экономической ситуации в мире и формировать конкурентные преимущества, обеспечивая приток грузов.

За период 2021–2024 гг. в некоторых морских портах произошли существенные изменения грузооборота, причины которых вызваны санкциями, введенными против нашей страны. Многие портовые операторы заняты поиском альтернативных грузопотоков. Так, например, в порту Балтийского бассейна АО «Петролеспорт», в основном специализирующееся на перевалке крупнотоннажных контейнеров (КК), за 2022 г. сократило обработку КК практически на 50 %, что повлекло за собой диверсификацию грузопотока: КК были заменены генеральными и навалочными грузами в мягкой таре [1]. Однако не все порты смогли провести диверсификацию грузопотока и перегруппироваться на другие виды грузов. Это связано с тем, что многие порты специализируются

[1] Федеральное агентство морского и речного транспорта (Росморречфлот). [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://morflot.gov.ru/novosti/lenta/gruzooborot-morskikh-portov-rossii-v-2022-godu-vyros-na-0-7-do-841-5-mln-tonn/ (дата обращения: 11.04.2025).

на одном виде грузов, и для обработки других необходимо иметь парк специализированного подъемно-транспортного оборудования (ПТО). Замена ПТО связана не только с наиболее капиталоемкими затратами, но и занимает длительный период времени. Вопрос диверсификации является достаточно острым из-за неопределенности грузопотоков и внутренней конкуренции между стивидорными компаниями.

Целью данного исследования служит выявление прогнозных значений грузооборота по пяти морским бассейнам РФ.

Для решения поставленной цели были определены следующие задачи исследования:

– провести анализ грузооборота морских бассейнов за 2021–2025 гг.;
– определить ожидаемый грузооборот морских бассейнов, используя методы прогнозирования;
– полученные прогнозные значения сопоставить с актуальными статистическими данными, что позволит выявить их соответствие.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Внешнеторговые операции являются неотъемлемой частью экономики. Анализ грузооборота морских бассейнов позволяет выявить основные направления и номенклатуру грузопотоков, что дает возможность определить стратегическое планирование развития инфраструктуры портов бассейна и промышленного производства, прилегающего к морскому бассейну региона. В работе [3] приведены данные по грузообороту морских бассейнов РФ за период 2006–2018 гг., а также отмечается, что увеличение грузооборота в данный период было обеспечено увеличением объемов перевалки угля, руды, нефти и нефтепродуктов, сжиженного газа, древесины, грузов в контейнерах и зерна. На основе имеющихся статистических данных морских бассейнов был выполнен анализ грузооборота за период 2021–2024 гг. (рис. 1). В морских портах Балтийского бассейна в течение 2024 г. наблюдалось некоторое увеличение грузооборота по сравнению с 2021 г. (менее чем на 8 %), составив около 273 млн. По сухим грузам грузооборот составил 123,8 млн т, по наливным грузам в 2024 г. наблюдался рост грузооборота по сравнению с 2021 г. на 18 %, который и составил 149,3 млн т. Анализ Балтийского бассейна показал, что грузопоток был ориентирован на порты стран Евросоюза (ЕС), но в связи с произошедшими событиями произошла переориентация на новых партнеров из стран Юга (Африка) и Азии (Китай) [2, 3].

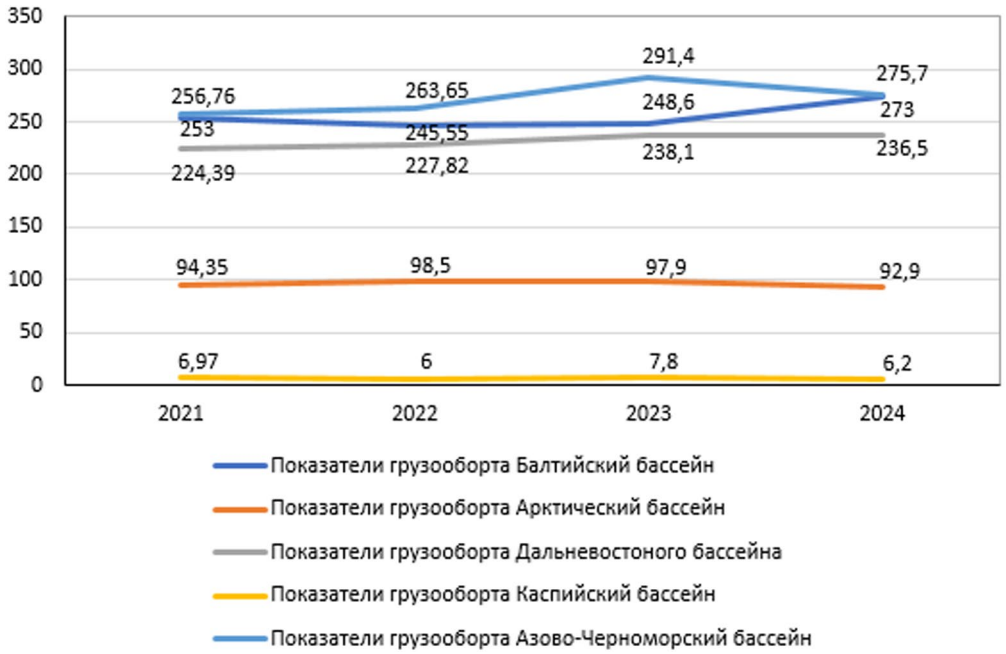


Рис. 1. Динамика грузооборота морских бассейнов России за 2021–2024 гг.
Fig. 1. Cargo Turnover Trends in Russian Sea Basins, 2021–2024

Грузооборот Арктического бассейна в 2024 г. сократился на 1,7 % по сравнению с 2021 г., и составил почти 93 млн. т (см. рис. 1). Из него перевалка навалочных, генеральных грузов составила 26,1 млн. т, что в процентном соотношении к 2021 г. составило +10 %, или 29 млн т. Перевалка нефтеналивных грузов в 2024 г. увеличилась по сравнению с 2021 г. на 2 %, составив 66,9 млн т [4].

В Дальневосточном бассейне грузооборот в 2024 г. вырос на 5 % по сравнению с 2021 г. и составил 236,5 млн т (см. рис. 1). Перевалка из него навалочных, генеральных и других грузов составила 154,5 млн т, что на 3,5 % больше в сравнении с уровнем 2021 г.; наливных грузов — 81,9 млн т, что представляет увеличение по сравнению с 2021 г. на 7,7 % [5].

Каспийский бассейн сократил свой грузооборот относительно 2021 г. на 12,5 % и составил 6,2 млн т (см. рис. 1). Из него перевалка навалочных, генеральных и других грузов составила — 4,2 млн т,, что на 62 % больше по сравнению с уровнем 2021 г., наливных грузов — 2 млн т, что уменьшилось по сравнению с 2021 г. на 53 % [6].

Грузооборот Азово-Черноморского бассейна в 2024 г., по сравнению с 2021 г., увеличился на 7 % и составил 275,7 млн т (см. рис. 1). Из этого грузооборота перевалка навалочных, генеральных и других грузов составила 131,2 млн т, что на 13 % больше по сравнению с 2021 г. По наливным грузам грузооборот увеличился на 1,5 % по сравнению с 2021 г. и составил 144,5 млн т [7].

В период 2021–2024 гг. в Арктическом и Каспийском бассейнах произошел равномерный спад грузооборота. Данная динамика обусловлена совокупностью причин. В Арктическом бассейне отмечалось падение перевалки, что объясняется сокращением объемов транспортировки угля и нефти по наиболее протяженным логистическим цепочкам. В Каспийском бассейне наблюдается уменьшение экспорта нефтепродуктов, вызванное сезонным увеличением внутреннего спроса на фоне снижения производственных мощностей из-за проведения ремонтных работ на ряде нефтеперерабатывающих заводов.

Кроме того, на общий спад грузооборота оказали влияние сокращение экспорта угля, сдерживаемое инфраструктурными ограничениями железнодорожного транспорта, и снижение мировых цен, делающих некоторые экспортные направления нерентабельными, а также уменьшение перевалки черных металлов и руды. Проблемы с развитием портовой инфраструктуры, включая задержки в проведении строительных работ и ввод в эксплуатацию новых объектов, создают существенные ограничения. Динамичный характер ледовой обстановки в Арктическом регионе и ее сезонные особенности создают вызовы для навигации и планирования транспортных операций.

Прогнозирование и анализ грузооборота портов рассмотрен в работах [8–14]. Для прогнозирования работы объектов экономики используются различные методы, которые разделяют на *интуитивные*, основанные на опыте и интуитивно-логическом мышлении, и *методы на базе экономико-математического прогнозирования*. Прогнозирование грузооборота производится на основе имеющейся статистической информации, но имеет вероятностный характер, так как в прогнозе присутствует доля неопределенности или случайная компонента, в ряде случаев не зависящая от владельца процесса. Для сокращения интервалов неопределенности при прогнозировании грузооборота порта можно использовать теорию вероятности. В работе [15] представлен метод сокращения интервалов, в рамках которого был рассмотрен подход к интервальному прогнозированию по сегментам грузооборота. Отмечается, что с помощью сокращения на каждой итерации интервала неопределенности повышается точность прогнозирования грузооборота. Данный метод предполагает прогноз грузооборота для конкретного порта.

Анализ трендов и прогнозирование изменений экономической ситуации необходим для принятия управленческих решений. Оценку грузооборота морских бассейнов можно выполнять различными методами. Использование временных рядов, основанное на изучении статистических данных за определенный временной период, позволяет выявить закономерности изменения анализируемых показателей. Анализ временных рядов позволяет работать с имеющимися статистическими данными [16].

В работах [8, 9, 11] рассмотрено прогнозирование с использованием OLS-модели, которая решается методом наименьших квадратов (МНК) средствами Microsoft Excel. Применение МНК ограничено определенными требованиями относительно случайной величины. В связи с этим предлагается рассматривать авторегрессионную модель с распределенными лагами ADLM, учитывающую воздействие динамических рядов, сформированных в предыдущие периоды [9].

Задачи прогнозирования решаются методом Хольта – Винтерса и модели ARIMA. Прогноз продаж товаров различной номенклатуры методом Хольта – Винтерса и модели ARIMA показал, что модель ARIMA успешно решает поставленную задачу прогнозирования продаж и ее показатели точности (в диапазоне от 78 % до 99,8 %) уступают результатам, демонстрируемым в модели прогноза Хольта – Винтерса [17].

В работе [18] авторы предложили использовать для прогнозирования валютных курсов метод Хольта – Винтерса и метод экспоненциального сглаживания. Авторы детально проанализировали оба метода, фокусируя внимание на их способности выявлять тенденции роста или падения курсов. Проанализировав итоги проведенного анализа, исследователи пришли к выводу о структурном сходстве этих двух подходов и их пригодности для прогнозирования курса валют.

Прогноз по методу экспоненциального сглаживания является оптимальным вариантом прогнозов, когда известно прогнозируемое значение в основном за несколько дней или недель. Главным отличием метода экспоненциального сглаживания от метода Хольта – Винтерса является отсутствие учета сезонности и тренда изменения прогноза, что приводит к формированию прогноза с фиксированным значением. Вследствие этого прогноз по методу экспоненциального сглаживания получается с эффектом случайных колебаний, что является недостатком данного метода. Метод Хольта – Винтерса может быть применен для прогнозирования при имеющихся статистических значениях за определенный период сбора информации.

Прогнозирование с помощью скользящего среднего и авторегрессии (ARIMA), а также модели для анализа и прогнозирования временных рядов широко применяются в бизнес-процессах для планирования. Их ключевое преимущество по сравнению с методом Холта – Винтерса заключается в гибкости и способности улавливать широкий спектр характеристик временных рядов. Тем не менее ARIMA имеет свои недостатки: она менее эффективна для прогнозирования несезонных данных ввиду предположения о линейной связи между наблюдениями и их предыдущими значениями, что не всегда отражает реальность. Преимущество метода Хольта – Винтерса по сравнению с ARIMA заключается в его способности интегрировать тренд и сезонность, что является критически важным для анализа временных рядов, демонстрирующих годовые колебания спроса. Кроме того, данный метод обеспечивает возможность построения долгосрочных прогнозов благодаря учету множества прогностических факторов.

Таким образом сравнивая метод Хольта – Винтерса с методами экспоненциального сглаживания и ARIMA (скользящего среднего и авторегрессии), используемых для прогнозирования, видно, что эти методы схожи, но их в основном используют в различных производствах и предприятиях, где существует изменение спроса или подсчет количества продаж, что не совсем подходит для определения прогнозов грузооборота порта.

Метод Хольта – Винтерса для анализа и прогнозирования динамики временных рядов в сфере логистических железнодорожных перевозок был рассмотрен в работе [19], в которой отмечалось, что данный метод может применяться для планирования перевозок как при составлении стратегии перевозки, так и при тактическом планировании. В контексте исследования, представленного в работе [19], следует отметить, что при получении результатов по методу Хольта – Винтерса, автор не сравнивает его с другими возможными методами прогноза для уточнения своих параметров, вследствие чего точность выполняемого прогноза нельзя считать полной и точной.

Сравнивая метод Хольта – Винтерса с методами экспоненциального сглаживания, скользящего среднего и авторегрессии, используемых для прогнозирования, видно, что данные методы

схожи, но их в основном используют на различных производствах и предприятиях, где происходит изменение спроса или подсчет количества продаж, что не совсем подходит для определения прогнозов грузооборота порта.

Анализ научных публикаций [8, 15, 16, 17, 19] показал, что в настоящее время существует большое количество методов математического моделирования для расчетов прогнозов. Авторы данного исследования предлагают для прогнозирования грузооборота морских бассейнов использовать метод Хольта – Винтерса, который базируется на динамике временных рядов.

Алгоритм выполнения прогноза по методу Хольта – Винтерса

Экспоненциально-сглаженный ряд вычисляется с использованием следующей формулы:

$$L_i = \frac{\alpha Q_i}{S_{i-s}} + (1-\alpha)(L_{i-1} - T_{i-1}), \tag{1}$$

где α — коэффициент для построения математической модели (данные параметры необходимы для прогнозирования и сглаживания прогноза от 0 до 1, подбираются вручную);

S_{i-s} — сезонный коэффициент за прошлый период;

Q_i — статистический параметр грузооборота;

L_{i-1} — экспоненциально-сглаженный ряд за предыдущий период;

T_{i-1} — значение тренда:

$$T_i = k(L_i - L_{i-1}) + (1-k)T_{i-1}. \tag{2}$$

Определение коэффициента сезонности:

$$S_i = \frac{kQ_i}{L_i} + (1+k)S_{i-s}. \tag{3}$$

При реализации прогнозирования методом Хольта – Винтерса обновление компонента сезонности S_i осуществляется с учетом двух основных факторов: предыдущего значения коэффициента сезонности для аналогичного периода S_{i-s} и заданного пользователем коэффициента сглаживания k, который определяет степень влияния на итоговый результат. На основе этих параметров формируется прогноз на определенный горизонт планирования:

$$\widehat{Q}_{i-p} = (L_i + pT_i)S_{i-s+p}, \tag{4}$$

где $\widehat{Q}_{i-p}$ — прогнозируемый параметр на p-й период вперед;

S_{i-s+p} — сезонный коэффициент, характерный для данного периода, но относящийся к последнему завершенному сезону.

Алгоритм выполнения прогноза с использованием встроенной функции в Excel.

Для верификации результатов и повышения точности составляется дополнительный прогноз с использованием встроенной функции в Excel.

Для выполнения данного метода в первую очередь необходимо задаться статистическими данными в период 2021–2024 гг., после чего выполнить ряд действий, связанных с формированием конечной таблицы с последующим построением диаграммы прогнозов.

Метод с использованием встроенной функции в Excel основан на экспоненциальном сглаживании (ETS), которая помогает прогнозировать будущие значения, и анализе имеющихся статистических данных. Его главная идея заключается в том, что более свежие данные считаются важнее старых. Вес каждого предыдущего значения уменьшается со временем, причем это происходит очень быстро, по экспоненте.

Результаты (Results)

В результате выполненных расчетов были получены методом Хольта – Винтерса прогнозы по пяти российским бассейнам на 2025 г., представленные на рис. 2–6 и в табл. 1–5.

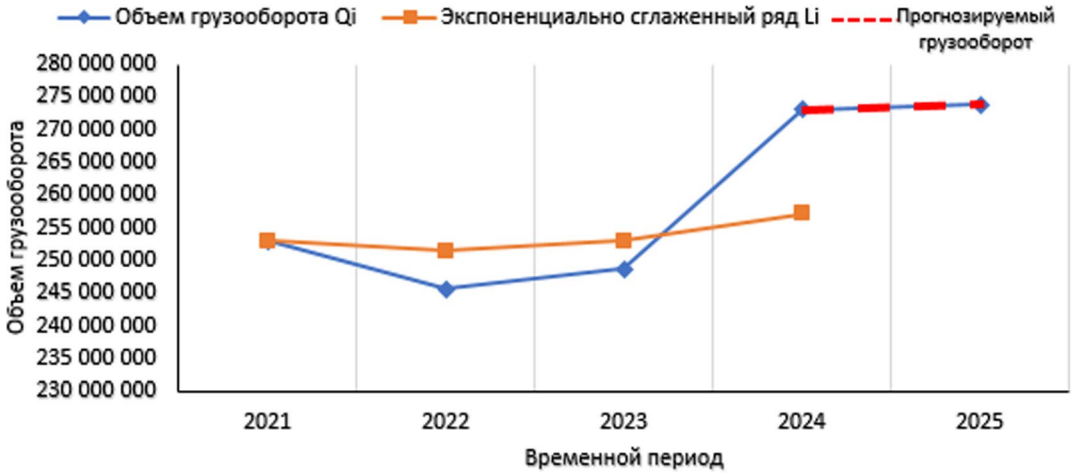


Рис. 2. Диаграмма прогнозов грузооборота Балтийского бассейна на 2025 г., выполненная методом Хольта – Винтерса

Fig. 2. Cargo Turnover Forecast for the Baltic Basin in 2025 Using the Holt – Winters Method

Таблица 1

Результаты прогноза грузооборота Балтийского бассейна на 2025 г., полученные методом Хольта – Винтерса

Table 1

Baltic Basin Cargo Turnover Forecast Results for 2025 Obtained Using the Holt – Winters Method

Год	Объем грузооборота	Экспоненциально сглаженный ряд	Значение тренда	Коэффициент сезонности в предыдущем периоде
	Qi	*Li*	*Ti*	*Si*
2021	253 000 000	253 000 000	0	1
2022	245 550 000	251 510 000	–1266500	0,97985766
2023	248 600 000	252 963 264	1045299,33	0,982317333
2024	273 000 000	257 117 225	3687661,607	1,04985423
Прогнозируемый год	Прогнозируемый грузооборот			
	$\widehat{Qi}$			
2025	273 807 113,1			

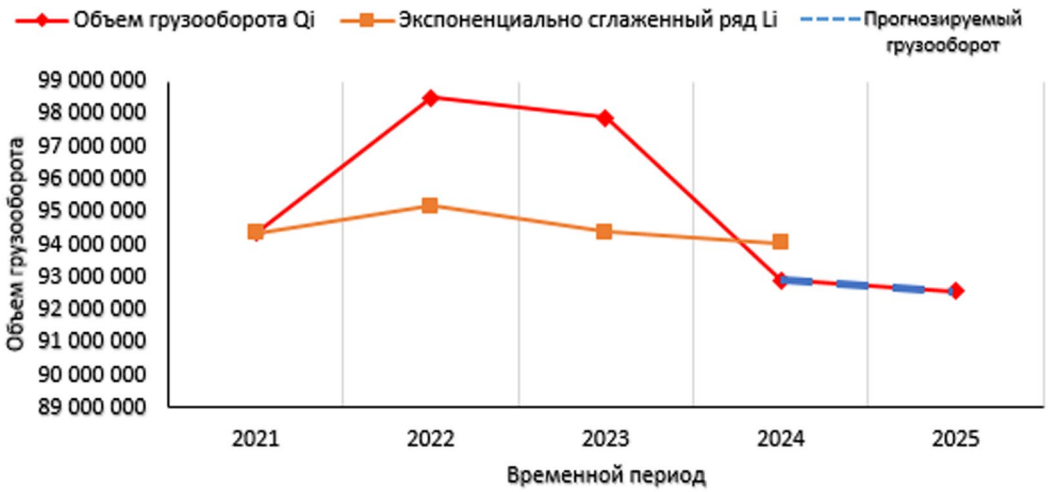


Рис. 3. Диаграмма прогнозов грузооборота Арктического бассейна на 2025 г., выполненная методом Хольта – Винтерса

Fig. 3. Cargo Turnover Forecast for the Arctic Basin in 2025 Using the Holt – Winters Method

Таблица 2

Результаты прогноза грузооборота Арктического бассейна на 2025 г., полученные методом Хольта – Винтерса

Table 2

Arctic Basin Cargo Turnover Forecast Results for 2025 Obtained Using the Holt – Winters Method

Год	Объем грузооборота	Экспоненциально сглаженный ряд	Значение тренда	Коэффициент сезонности в предыдущем периоде
	Qi	*Li*	*Ti*	*Si*
2021	94 350 000	94 350 000	0	1
2022	98 500 000	95 180 000	830000	1,034881278
2023	97 900 000	94 400 045	–779955,3299	1,03707578
2024	92 900 000	94 059 759	–340285,4262	0,987669974
Прогнозируемый год	Прогнозируемый грузооборот			
	$\widehat{Qi}$			
2025	92 563 910,3			

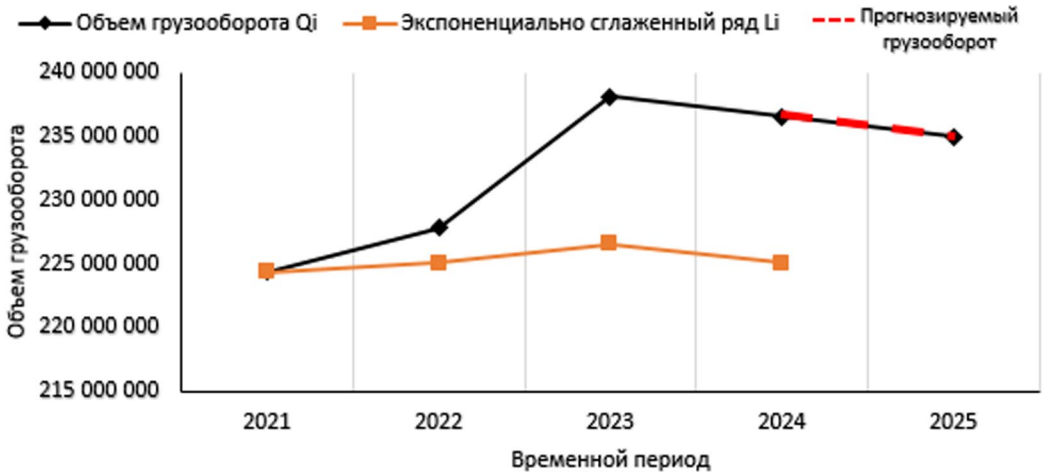


Рис. 4. Диаграмма прогнозов грузооборота Дальневосточного бассейна на 2025 г., выполненная методом Холта – Винтерса

Fig. 4. Cargo Turnover Forecast for the Far Eastern Basin in 2025 Using the Holt – Winters Method

Таблица 3

Результаты прогноза грузооборота Дальневосточного бассейна на 2025 г., полученные методом Хольта – Винтерса

Table 3

Cargo Turnover Forecast Results for the Far Eastern Basin in 2025 Obtained Using the Holt – Winters Method

Год	Объем грузооборота	Экспоненциально сглаженный ряд	Значение тренда	Коэффициент сезонности в предыдущем периоде
	Qi	*Li*	*Ti*	*Si*
2021	224 390 000	224 390 000	0	1
2022	227 820 000	225 076 000	686000	1,012191438
2023	238 100 000	226 558 436	1482436,309	1,050942988
2024	236 500 000	225 067 999	–1490437,496	1,050793543
Прогнозируемый год	Прогнозируемый грузооборот			
	$\widehat{Qi}$			
2025	234 933 857,9			

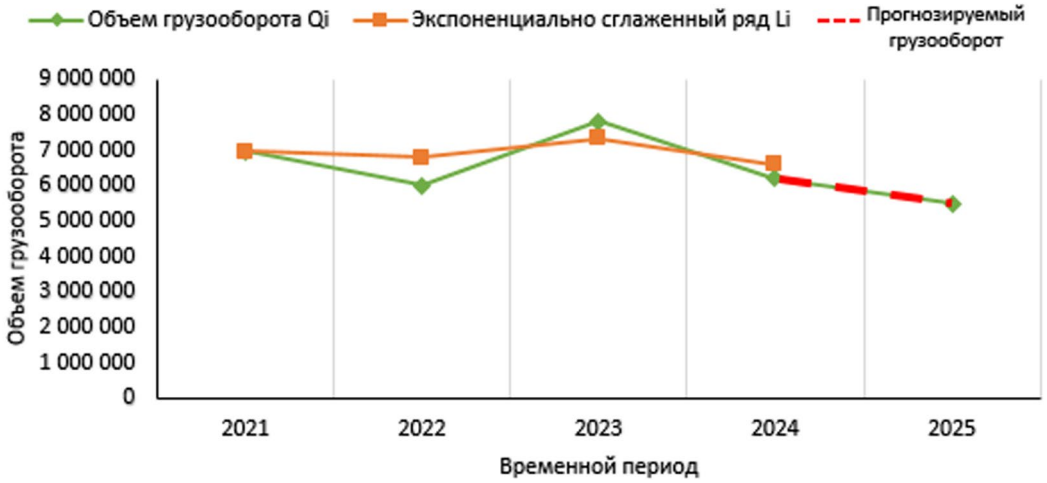


Рис. 5. Диаграмма прогнозов грузооборота Каспийского бассейна на 2025 г., выполненная методом Хольта – Винтерса

Fig. 5. Cargo Turnover Forecast for the Caspian Basin in 2025 Using the Holt – Winters Method

Таблица 4

Результаты прогноза грузооборота Каспийского бассейна на 2025 год, полученные методом Хольта – Винтерса

Table 4

Caspian Basin Cargo Turnover Forecast Results for 2025 Obtained Using the Holt – Winters Method

Год	Объем грузооборота	Экспоненциально сглаженный ряд	Значение тренда	Коэффициент сезонности в предыдущем периоде
	Qi	*Li*	*Ti*	*Si*
2021	6 970 000	6 970 000	0	1
2022	6 000 000	6 776 000	–194000	0,885478158
2023	7 800 000	7 337 760	561760	1,062994701
2024	6 200 000	6 587 316	–750444,3077	0,941202804
Прогнозируемый год	Прогнозируемый грузооборот			
	$\widehat{Qi}$			
2025	5 493 679,713			

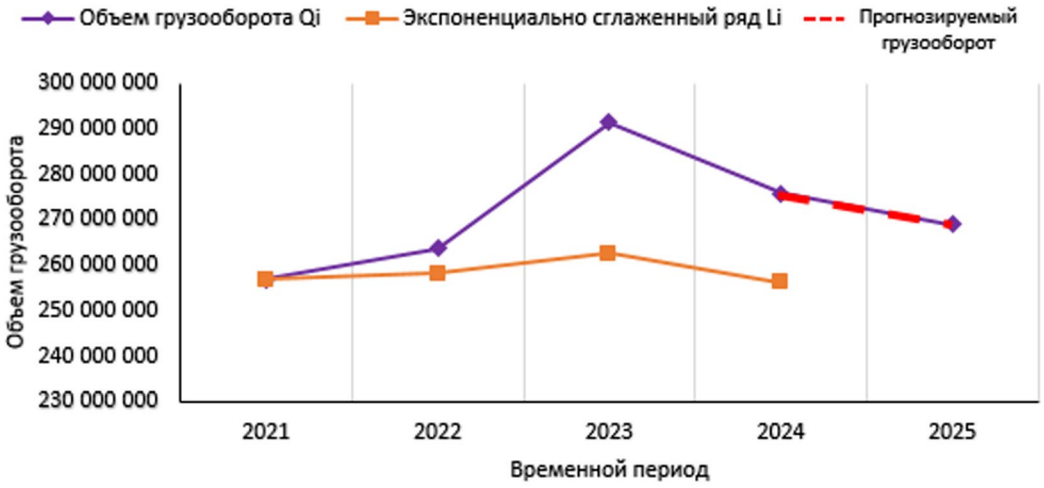


Рис. 6. Диаграмма прогнозов грузооборота Азово-Черноморского бассейна на 2025 г., выполненная методом Хольта – Винтерса

Fig. 6. Cargo Turnover Forecast for the Azov-Black Sea Basin in 2025 Using the Holt – Winters Method

Таблица 5

Результаты прогноза грузооборота Азово-Черноморского бассейна на 2025 г., полученные методом Хольта – Винтерса

Table 5

Cargo Turnover Forecast Results for the Azov-Black Sea Basin in 2025 Obtained Using the Holt – Winters Method

Год	Объем грузооборота	Экспоненциально сглаженный ряд	Значение тренда	Коэффициент сезонности в предыдущем периоде
	Qi	*Li*	*Ti*	*Si*
2021	256 760 000	256 760 000	0	1
2022	263 650 000	258 138 000	1378000	1,02135292
2023	291 400 000	262 469 569	4331568,898	1,110223944
2024	275 700 000	256 176 056	-6293513,342	1,076212995
Прогнозируемый год	Прогнозируемый грузооборот			
	$\widehat{Qi}$			
2025	268 926 839,2			

Для верификации результатов и повышения точности производится дополнительный прогноз с использованием встроенной функции в Excel также по пяти морским бассейнам на 2025 г., представленный на рис. 7 и в табл. 6.

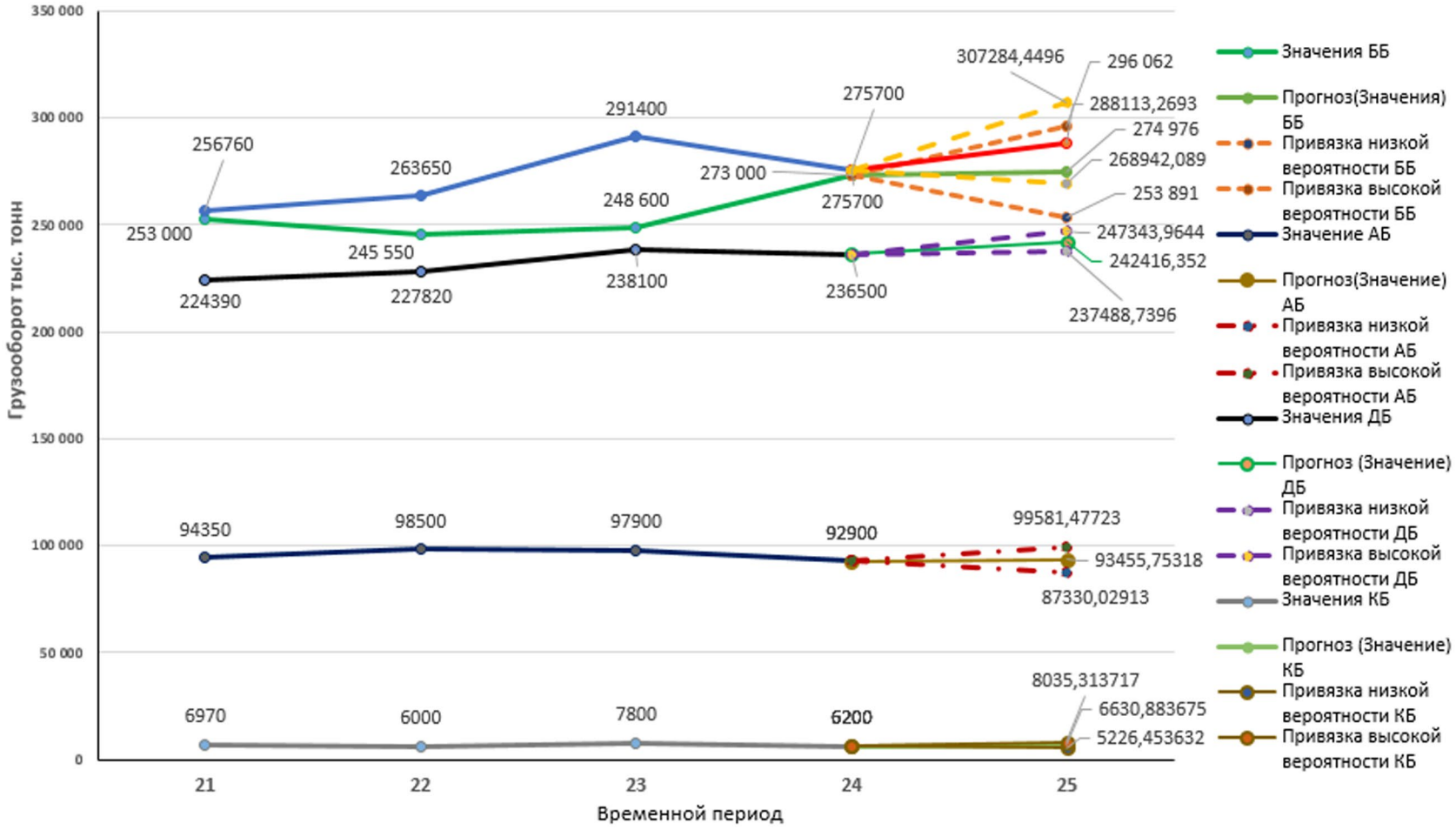


Рис. 7. Прогнозирование грузооборота морских бассейнов в 2025 г.
с использованием встроенной функции предсказания в Excel
Fig. 7. Sea Basin Cargo Turnover Forecast for 2025 Using Excel's Built-in Forecast Function

Таблица 6

Результаты прогноза грузооборота морских бассейнов на 2025 г., полученные с помощью встроенной функции предсказания в Excel

Table 6

Sea Basin Cargo Turnover Forecast Results for 2025 Obtained Using Excel's Built-in Forecast Function

Параметры / Период	2021	2022	2023	2024	2025
Значение ББ, тыс. т	253 000	245 550	248 600	273 000	–
Прогноз (значение) ББ, тыс. т	–	–	–	273 000	274 976
Привязка низкой вероятности ББ, тыс. т	–	–	–	273 000	253 891
Привязка высокой вероятности ББ, тыс. т	–	–	–	273 000	296 062
Значение АБ, тыс. т	94 350	98 500	97 900	92 900	–
Прогноз (значение) АБ, тыс. т	–	–	–	92 900	93 455,75
Привязка низкой вероятности АБ, тыс. т	–	–	–	92 900	87 330,02
Привязка высокой вероятности АБ, тыс. т	–	–	–	92 900	99 581,47
Значение ДБ, тыс. т	224 390	227 820	238 100	236 500	–
Прогноз (значение) ДБ, тыс. т	–	–	–	236 500	242 416,35
Привязка низкой вероятности ДБ, тыс. т	–	–	–	236 500	237 488,73
Привязка высокой вероятности ДБ, тыс. т	–	–	–	236 500	246 343,96
Значение КБ, тыс. т	6 970	6 000	7 800	6 200	–
Прогноз (значение) КБ, тыс. т	–	–	–	6 200	6 630,88
Привязка низкой вероятности ДБ, тыс. т	–	–	–	6 200	5 226,45
Привязка высокой вероятности КБ, тыс. т	–	–	–	6 200	8 035,31
Значение АЧБ, тыс. т	256 760	263 650	291 400	275 700	–
Прогноз (значение) АЧБ, тыс. т	–	–	–	275 700	288 113,26
Привязка низкой вероятности АЧБ, тыс. т	–	–	–	275 700	268 942,08
Привязка высокой вероятности АЧБ, тыс. т	–	–	–	275 700	307 284,44

Прогнозирование объемов грузооборота морских бассейнов на 2025 г., выполненное с использованием встроенной функции предсказания в Excel, выявило вероятностные оценки, отражающие как потенциальный рост, так и снижение грузопотоков в различных бассейнах. Эти результаты служат индикатором общей динамики прогнозируемых параметров.

Обсуждение (Discussion)

По полученным значениям для определения точности выполненного прогноза необходимо сравнить их с фактическими параметрами грузооборота на 2025 г.[2] (табл. 7 и 8).

Таблица 7

Сравнения прогнозируемых и фактических параметров грузооборота по бассейнам на 2025 г., выполненная методом Хольта – Винтерса

Table 7

Comparison of Forecast and Actual Cargo Turnover Indicators by Basin for 2025 Using the Holt – Winters Method

Морские бассейны России	Прогнозируемые значения грузооборота на 2025 г.	Фактическое значения грузооборота на 2025 г.	Соответствие/ несоответствие или приближено к соответствию	Комментарий
Балтийские бассейн	273,8 млн т	271,3 млн т	Приближено к соответствию	Прогнозируемое значение полностью совпадает с фактическим
Арктический бассейн	92,5 млн т	87,1 млн т	Приближено к соответствию	Прогнозируемое значение приближено фактическому значению
Дальневосточный бассейн	234,9 млн т	252,1 млн т	Несоответствие	Прогнозируемое значение не соответствует фактическому значению, но согласно прогнозу, параметр грузооборота идет на увеличение так же, как и фактическое значение
Каспийский бассейн	5,4 млн т	8,6 млн т	Несоответствие	Прогнозируемое значение полностью не соответствует фактическому значению, так как прогнозируемое значение показывает спад грузооборота, а фактическое, наоборот, увеличение грузооборота, что означает полную прогнозируемую ошибку
Азово-Черноморский бассейн	268,9 млн т	265,4 млн т	Приближено к соответствию	Прогнозируемое значение полностью совпадает с фактическим

[2] Статистика // Информационно-аналитический журнал «Морские Порты». 2025. № 8(239). С. 56–63.

Таблица 8

Сравнения прогнозируемых и фактических параметров грузооборота по бассейнам на 2025 г.

Table 8

Comparison of Forecast and Actual Cargo Turnover Indicators by Basin for 2025

Морские бассейны России	Прогнозируемые значения грузооборота на 2025 г.	Фактическое значения грузооборота на 2025 г.	Соответствие / несоответствие или приближено к соответствию
Балтийские бассейн	В диапазоне 296, 07 млн т	271,3 млн т	Соответствиие
	В диапазоне 274, 9 млн т		
	В диапазоне 253, 8 млн т		
Арктический бассейн	В диапазоне 99, 5 млн т	87,1 млн т	Приближено к соответствию
	В диапазоне 93, 4 млн т		
	В диапазоне 87, 3 млн т		
Дальневосточный бассейн	В диапазоне 247, 3 млн т	252,1 млн т	Приближено к соответствию
	В диапазоне 242,4 млн т		
	В диапазоне 237,4 млн т		
Каспийский бассейн	В диапазоне 8,1 млн т	8,6 млн т	Приближено к соответствию
	В диапазоне 6,6 млн т		
	В диапазоне 5,2 млн т		
Азово-Черноморский бассейн	В диапазоне 307,2 млн т	265,4 млн т	Приближено к соответствию
	В диапазоне 288,1 млн т		
	В диапазоне 268,9 млн т		

При сравнении рассмотренных методов прогнозирования следует отметить, что применение методов математического моделирования позволяет прогнозировать функционирование морского бассейна, выявляя потенциальные переходы роста и спада грузооборота.

Метод Хольта – Винтерса представляет интерес своей интуитивной понятностью и адаптивностью. Его структура решений прозрачна, а возможность настройки параметров α, β позволяет точно регулировать степень «жесткости» или «мягкости» прогноза, тем самым влияя на его точность. Несмотря на то, что метод прогнозирования с помощью встроенной функции предсказания Excel отличается простотой реализации, он характеризуется ограниченными возможностями программной настройки. Ее выходные данные визуализируются как диапазон прогнозируемых значений, который несмотря на вариативность, способен точно отражать фактический грузооборот.

Анализ годовых прогнозов грузооборота и сравнение предложенных методов позволяют сделать заключение, что они пригодны для практического применения прогнозирования грузооборота в различных временных диапазонах.

Заключение (Conclusion)

В результате выявленных трендов грузооборота морских бассейнах РФ необходимо обратить внимание на Балтийский, Азово-Черноморский и Дальневосточный бассейны. Согласно статистическим данным эти бассейны в период 2023–2024 гг. поддерживали высокий уровень грузооборота, что свидетельствует о потенциале дальнейшего развития.

Увеличение грузооборота морских бассейнов будет сопровождаться внутренней конкуренцией, которая зависит от различных факторов и преимуществ. Преимуществом Азово-Черноморского бассейна по сравнению с Балтийским бассейном является географическое положение. Порты Балтийского бассейна ориентированы на Европу, что создает трудности ввиду санкций и решения прибалтийских стран закрыть свои порты для прохода российских судов.

В Азово-Черноморском бассейне таких проблем нет, но существует вероятность террористических атак портов и морских судов.

Формирование новых торговых связей со странами Юго-Восточной Азии открывают перспективы для развития Дальневосточного бассейна. Еще одним перевесом в сторону стран Юга и Востока является активная модернизация Азово-Черноморских и дальневосточных портов, их инфраструктуры и производственных мощностей. Например, реализация проекта по модернизации и увеличению мощностей порта Тамань и Ванино дает предпосылки для увеличения пропускной способности данных регионов.

В контексте прогнозируемого грузооборота существующие методы демонстрируют свою значимость преимущественно в теоретическом аспекте, обеспечивая получение прогнозных значений посредством применения математических прогнозов. При этом следует отметить, что независимо от желаемого воздействия на фактический грузооборот данные методы представляют собой лишь прогностические инструменты. В первую очередь необходимо учитывать потенциальное влияние внешних факторов, таких как санкционные ограничения и иные форс-мажорные обстоятельства.

При использовании полученных прогнозных данных критически важным является регулярный анализ квартальной статистической информации. Это позволит своевременно вносить необходимые корректировки в разработанную модель прогнозирования, отслеживать изменения параметров за отчетные периоды по морским бассейнам и в итоге достигать более высокой точности прогнозов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Белозерцева Н. П.* Тенденции и трансформации на Дальневосточном рынке контейнерных перевозок в 2022 году: особенности и противоречия / Н. П. Белозерцева, М. Е. Брылева // Логистика: форсайт-исследования, профессия, практика : материалы III Национальной научно-образовательной конференции : в 2 ч., Санкт-Петербург, 28 октября 2022 года. Том Часть 1. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный экономический университет, 2022. — С. 291–296.

2. *Алимурадов М. К.* Стратегические приоритеты развития структуры грузооборота морских портов России / М. К. Алимурадов, А. С. Горячева, А. Н. Курбацкий // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. — 2021. — Т. 14. — № 4. — С. 97–112. — EDN IRVQAC. DOI: 10.15838/esc.2021.4.76.6.

3. *Гулый И. М.* Структурные сдвиги в поставках грузов через порты Балтийского бассейна и долгосрочный прогноз грузооборота морских портов Северо-Запада до 2040 года / И. М. Гулый, С. Л. Шатров // Экономические науки. — 2024. — № 240. — С. 134–138. — EDN JBPVEU. DOI: 10.14451/1.240.134.

4. *Комиссаров Р. С.* Анализ грузооборота морских портов Арктического бассейна за 2020-2022 годы / Р. С. Комиссаров // Студенческий вестник. — 2023. — № 5–4(244). — С. 66–67.

5. *Мартынов Д. В.* Анализ эффективности морских портов Дальневосточного бассейна на основе стейкхолдерского подхода / Д. В. Мартынов, Л. С. Мазелис // Национальная безопасность / Nota Bene. — 2025. — № 1.— С. 20–43. — EDN BDINEE. DOI: 10.7256/2454-0668.2025.1.73011.

6. *Малышенко Н. А.* Анализ грузооборота и перспективы развития российских портов / Н. А. Малышенко, Н. Н. Тарасова // Актуальные проблемы развития судоходства и транспорта : Материалы Национальной научно-технической конференции с международным участием, Владивосток, 15–16 ноября 2023 года. Владивосток: Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 2023. — С. 156–162.

7. *Классовская М. И.* Анализ грузооборота транспортной системы Азово-Черноморского бассейна / М. И. Классовская // Региональная экономика и управление: электронный научный журнал. — 2022. — № 2(70). EDN BYAZAP.

8. *Ботнарюк М. В.* Эконометрическая модель прогноза грузооборота морских портов / М. В. Ботнарюк, Н. Н. Ксензова // Мир транспорта. — 2024. — Т. 22. — № 4(113). — С. 44–53. — EDN WRUWKB. DOI: 10.30932/1992-3252-2024-22-4-6.

9. Исследование корреляционной зависимости грузовой базы морских портов России от ключевых макроэкономических показателей / М. В. Ботнарюк, Н. Н. Ксензова, Э. Э. Субанов, А. М Сулейманов // Эксплуатация морского транспорта. — 2024. — № 1(110). — С. 28–36. — EDN JSNUCX. DOI: 10.34046/aumsuomt110/5.

10. *Голыжникова Д. Ю.* Влияние транспорта и его отдельных видов на рост экономики и ВВП России / Д. Ю. Голыжникова // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. — 2021. — № 8(200). — С. 19–25. — EDN FWYSLA. DOI: 10.33285/1999-6942-2021-8(200)-19-25.

11. *Иванова Е. Ю.* Текущее состояние и перспективы развития морских портов России / Е. Ю. Иванова // Транспортное дело России. — 2021. — № 1. — С. 158–160.

12. *Ивин Е. А.* Анализ состояния и перспективы развития грузопотоков через морские порты России / Е. А. Ивин, А. С. Горячева, А. Н. Курбацкий // Проблемы развития территории. — 2020. — № 2(106). — С. 62–80. — EDN ETQZXY. DOI: 10.15838/ptd.2020.2.106.5.

13. *Мартынов Д. В.* Об оценке влияния функционирования морских портов на социально-экономическое развитие региона / Д. В. Мартынов // Экономика и управление. — 2025. — Т. 31. — № 11. — С. 1500–1512. — EDN KGCUXQ. DOI: 10.35854/1998-1627-2025-11-1500-1512.

14. *Марченко С. С.* Исследование перспектив развития грузовых морских перевозок / С. С. Марченко, Л. Э. г. Мамедова, М. Е. Гоголюхина // Modern Economy Success. — 2021. — № 5. — С. 171–177.

15. *Гаврилов А. Н.* Метод сокращения интервалов неопределенности при прогнозировании грузооборота морских портов / А. Н. Гаврилов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2021. — № 62–63. — С. 42–49.

16. *Алексахина Л. В.* Алексахина, Л. В. Моделирование и прогнозирование экономических процессов в стратегировании развития морского транспорта / Л. В. Алексахина // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. — 2023. — № 4. — С. 221–230. — EDN WSQQAX. DOI: 10.26296/2619-0605.2023.4.4.020.

17. *Лукашевич Н. С.* Прогнозирование продаж на основе модели Хольта-Уинтерса / Н. С. Лукашевич, Е. Р. Темиргалиев, Т. В. Баранова // Вестник Карагандинского университета. Серия: Экономика. — 2022. — Т. 108. — № 4. — С. 172–179. — EDN AVARWU. DOI: 10.31489/2022Ec4/172-179.

18. *Труфанова Т. В.* Способы прогнозирования курса валют на основе моделей экспоненциального сглаживания и Хольта / Т. В. Труфанова, К. Д. Нещеменко // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. — 2019. — № 87. — С. 14–17. — EDN JYMREI. DOI: 10.22250/jasu.2019.87.14-17.

19. *Поздняков А. С.* Применение метода Хольта-Винтерса при анализе и прогнозировании динамики временных рядов / А. С. Поздняков // Проблемы организации и управления на транспорте : Сборник научных трудов студентов, магистрантов, аспирантов, молодых ученых и их научных руководителей (материалы межвузовской научно-практической конференции), Екатеринбург, 03 ноября 2016 года Екатеринбург: Уральский государственный университет путей сообщения, 2017. — С. 57–64.

REFERENCES

1. Belozertseva, N. P. and M. E. Bryleva. “Trends and transformations in the far eastern container transportation market in 2022: features and contradictions.” *Logistika: forsayt-issledovaniya, professiya, praktika : materialy III Natsional’noy nauchno-obrazovatel’noy konferentsii : v 2 ch., Sankt-Peterburg, 28 oktyabrya 2022 goda. Tom Chast’ 1.* Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy ekonomicheskiy universitet, 2022: 291–296.

2. Alimuradov, M. K., A. S. Goryacheva and A. N. Kurbatskiy. “Strategic Priorities for the Russian Seaports Cargo Turnover Structure Development.” *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast* 14.4 (2021): 97–112. DOI: 10.15838/esc.2021.4.76.6.

3. Gulyy, I. M. and S. L. Shatrov. “Structural shifts in cargo shipments through the ports of the baltic basin and the long-term forecast of cargo turnover at seaports in the northwest until 2040.” *Economic Sciences* 240 (2024): 134–138. DOI: 10.14451/1.240.134.

4. Komissarov, R. S. “Analiz gruzooborota morskikh portov Arkticheskogo basseyna za 2020-2022 gody.” *Studencheskiy vestnik* 5-4(244) (2023): 66–67.

5. Martynov, D. V. and L. S. Mazelis. “Analysis of the effectiveness of seaports in the far eastern basin based on a stakeholder approach.” *National Security / Nota Bene* 1 (2025): 20–43. DOI: 10.7256/2454-0668.2025.1.73011.

6. Malyshenko, N. A. and N. N. Tarasova. “Analysis of cargo turnover and development prospects of russian ports.” *Aktual’nye problemy razvitiya sudokhodstva i transporta : Materialy Natsional’noy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, Vladivostok, 15–16 noyabrya 2023 goda.* Vladivostok: Dal’nevostochnyy gosudarstvennyy tekhnicheskiy rybokhozyaystvennyy universitet, 2023: 156–162.

7. Klassovskaya, M. I. “Analysis of the cargo turnover of the transport system of the Azov-Black Sea basin.” *Regional Economy and Management: Electronic Scientific Journal* 2(70) (2022).

8. Botnaryuk, M. V. and N. N. Ksenzova. "Econometric model for forecasting cargo turnover at seaports." *World of Transport and Transportation* 22.4(113) (2024): 44–53. DOI: 10.30932/1992-3252-2024-22-4-6.

9. Botnaryuk, M. V., N. N. Ksenzova, E. E. Subanov and A. M. Suleymanov. "Research of correlation dependence of the Russian sea ports cargo base from key macroeconomic indicators." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 1(110) (2024): 28–36. DOI: 10.34046/aumsuomt110/5.

10. Golyzhnikova, D. Yu. "The impact of transport and its individual types on the growth of the russian economy and gross domestic product (gdp)." *Problems of Economics and Management of Oil and Gas Complex* 8(200) (2021): 19–25. DOI: 10.33285/1999-6942-2021-8(200)-19-25.

11. Ivanova, E. Yu. "Current state and prospects for the development of Russian seaports ." *Transport Business in Russia* 1 (2021): 158–160.

12. Ivin, E. A., A. S. Goryacheva and A. N. Kurbatskiy. "State analysis and development prospects of cargo traffic through the sea ports of russia." *Problems of Territory'S Development* 2(106) (2020): 62–80. DOI: 10.15838/ptd.2020.2.106.5.

13. Martynov, D. V. "Assessing the impact of seaport functionality on the socioeconomic development of a region." *Economics and Management* 31.11 (2025): 1500–1512. DOI: 10.35854/1998-1627-2025-11-1500-1512.

14. Marchenko, S. S., L. E. g. Mamedova and M. E. Gogolyukhina. "Research of prospects for the development of cargo sea transportation." *Modern Economy Success* 5 (2021): 171–177.

15. Gavrilov, A. N. "Metod sokrascheniya intervalov neopredelennosti pri prognozirovanii gruzooborota morskikh portov." *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 62-63 (2021): 42–49.

16. Aleksakhina, L. V. "Modeling and forecasting of economic processes in the strategic development of maritime transport." *Bulletin of The Kerch State Marine Technological University* 4 (2023): 221–230. DOI: 10.26296/2619-0605.2023.4.4.020.

17. Lukashevich, N. S., E. R. Temirgaliev and T. V. Baranova. "Sales projection based on model of holt-winters." *Bulletin of Karaganda University. Economy Series* 108.4 (2022): 172–179. DOI: 10.31489/2022Ec4/172-179.

18. Trufanova, T. V. and K. D. Neschemenko. "Sposoby prognozirovaniya kursa valyut na osnove modeley eksponentsial'nogo sglazhivaniya i Khol'ta." *Vestnik Amurskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i ekonomicheskie nauki* 87 (2019): 14–17. DOI: 10.22250/jasu.2019.87.14-17.

19. Pozdnyakov, A. S. "Primenenie metoda Khol'ta-Vintersa pri analize i prognozirovanii dinamiki vremennykh ryadov." *Problemy organizatsii i upravleniya na transporte : Sbornik nauchnykh trudov studentov, magistrantov, aspirantov, molodykh uchenykh i ikh nauchnykh rukovoditeley (materialy mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii), Ekaterinburg, 03 noyabrya 2016 goda* Ekaterinburg: Ural'skiy gosudarstvennyy universitet putey soobscheniya, 2017: 57–64.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Фомичев Станислав Алексеевич —
инженер 3-й категории,
ООО «АКВАМАРИНПРОЕКТ»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Гапсальская ул., д. 3 литер а, помещ. №409
e-mail: *stas12-02@mail.ru*

Фомичев Владимир Алексеевич —
инженер 3-й категории,
ООО «АКВАМАРИНПРОЕКТ»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Гапсальская ул., д. 3 литер а, помещ. №409
e-mail: *vova12.02@list.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zub, Igor V. —
PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping,
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg,
198035, Russian Federation
e-mail: *zubiv@gumrf.ru.*

Fomichev, Stanislav A. —
3rd category Engineer
LLC "AQUAMARINEPROJECT"
Room 409, 3 letter A, Gapsalskaya Str., St. Petersburg,
198035, Russian Federation
e-mail: *stas12-02@mail.ru*

Fomichev, Vladimir A. —
3rd category Engineer
LLC "AQUAMARINEPROJECT"
Room 409, 3 letter A, Gapsalskaya Str., St. Petersburg,
198035, Russian Federation
e-mail: *vova12.02@list.ru*

Статья поступила в редакцию 16 февраля 2026 г.
Received: Feb. 16, 2026.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-424-435 **EDN KMKLPN**

УДК: 629.5.014.5:624.145

УПРАВЛЯЕМОСТЬ СУДНА С АЗИМУТАЛЬНЫМ ПОДРУЛИВАЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ В ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЯХ

Н. Н. Матвиенко, Д. А. Акмайкин

ФГБОУ ВО «Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского», Владивосток, Российская Федерация

Темой работы является исследование управляемости судна, оснащенного азимутальными подруливающими устройствами, при движении в ледовых условиях. Актуальность работы обусловлена ростом интенсивности судоходства в арктических и субарктических районах, где движение судов сопровождается воздействием ледяного покрова, ветра и морского течения. В таких условиях маневренные характеристики судна приобретают особое значение для обеспечения безопасности плавания и повышения эффективности эксплуатации судов ледового класса. В работе рассмотрены особенности функционирования азимутальных и носовых подруливающих устройств при маневрировании во льдах. Показано, что возможность поворота колонки азимутального движителя позволяет формировать тягу в любом направлении горизонтальной плоскости, что обеспечивает высокую маневренность судна при выполнении сложных маневров и работе на малых скоростях. При этом отмечается, что взаимодействие гребного винта с ледяной средой приводит к снижению эффективности движителя вследствие нарушения структуры потока, дробления льда и возникновения дополнительных вибрационных нагрузок. Представлена математическая модель движения судна в ледовых условиях на основе дифференциальных уравнений, учитывающих силы и моменты, создаваемые движительными устройствами, ветровым воздействием, морским течением и ледовым сопротивлением. В модели использованы эмпирические и полуэмпирические зависимости для оценки аэродинамических, гидродинамических и ледовых нагрузок. Особое внимание уделено учету ледового сопротивления, включающему составляющие, связанные с разрушением ледяного покрова, перемещением обломков льда и динамическими ударными взаимодействиями корпуса судна со льдом. Полученная математическая модель позволяет комплексно учитывать основные факторы внешней среды и характеристики движительного комплекса при анализе маневренности судна. Результаты исследования могут быть использованы при разработке методов расчета управляемости судов ледового плавания, а также совершенствовании систем динамического позиционирования и управления движением судна в сложных ледовых условиях.

Ключевые слова: управляемость судна; ледовые условия; азимутальное подруливающее устройство; носовое подруливающее устройство; маневренность судна; ледовое сопротивление; математическая модель; взаимодействие судна со льдом; ледяной покров; динамика судна; дифференциальные уравнения; ледовые нагрузки.

Для цитирования:
Матвиенко Н. Н. Управляемость судна с азимутальным подруливающим устройством в ледовых условиях / Н. Н. Матвиенко, Д. А. Акмайкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 3. 424–435. EDN KMKLPN. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-424-435.

CONTROLLABILITY OF A VESSEL EQUIPPED WITH AN AZIMUTH THRUSTER IN ICE CONDITIONS

N. N. Matvienko, D. A. Akmaykin

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

The paper studies the controllability of a vessel equipped with azimuth thrusters when operating in ice conditions. The relevance of the study is determined by the increasing intensity of navigation in Arctic and subarctic regions, where vessel movement is affected by ice cover, wind, and sea currents. Under such conditions, vessel manoeuvring characteristics are of particular importance for ensuring navigational safety and improving

the operational efficiency of ice-class vessels. The paper considers the specific features of the operation of azimuth and bow thrusters during manoeuvring in ice. It is shown that the ability to rotate the azimuth thruster unit makes it possible to generate thrust in any direction in the horizontal plane, thereby ensuring high vessel manoeuvrability when performing complex manoeuvres and operating at low speeds. At the same time, it is noted that interaction between the propeller and ice reduces propulsion efficiency due to disruption of the flow structure, ice fragmentation, and additional vibration loads. A mathematical model of vessel motion in ice conditions is presented on the basis of differential equations that take into account the forces and moments generated by propulsion devices, wind action, sea current, and ice resistance. The model uses empirical and semi-empirical relationships to estimate aerodynamic, hydrodynamic, and ice loads. Particular attention is paid to ice resistance, including components associated with ice cover failure, the movement of ice fragments, and dynamic impact interaction between the vessel hull and ice. The obtained mathematical model makes it possible to comprehensively consider the main environmental factors and the characteristics of the propulsion system when analysing vessel manoeuvrability. The research results can be used in developing methods for calculating the controllability of ice-going vessels, as well as in improving dynamic positioning systems and vessel motion control systems under severe ice conditions.

Keywords: vessel controllability; ice conditions; azimuth thruster; bow thruster; vessel manoeuvrability; ice resistance; mathematical model; vessel–ice interaction; ice cover; vessel dynamics; differential equations; ice loads.

For citation:
Matvienko, Nestor N. and D. A. Akmaykin. “ Controllability of a vessel equipped with an azimuth thruster in ice conditions” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.3 (2026): 424–435. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-424-435.

Введение (Introduction)

Развитие морского транспорта и освоение арктических и субарктических регионов сопровождаются ростом объемов судоходства в тяжелых ледовых условиях. В таких условиях особое значение приобретают вопросы обеспечения безопасности плавания и повышения эффективности эксплуатации судов ледового класса. Одним из ключевых факторов, определяющих безопасность движения судна во льдах, является его управляемость. Одним из наиболее эффективных способов повышения маневренности судна является применение на нем азимутальных подруливающих устройств (АПУ). Данный тип движителя представляет собой поворотный электродвигатель, оборудованный гребным винтом, способный создавать тягу в любом направлении. Применение АПУ обеспечивает значительное повышение маневренности судна, особенно при движении на малых скоростях и выполнении сложных маневров, а также позволяет эффективно использовать их на ледоколах, судах снабжения и танкерах ледового класса [1].

Исследования управляемости судов с АПУ включают разработку математических моделей движения судна, экспериментальные исследования маневренных характеристик и численное моделирование гидродинамических процессов. Для описания маневрирования судов широко применяется математическая модель типа MMG (Manoeuvring Mathematical Model), позволяющая учитывать гидродинамические силы корпуса судна, а также силы и моменты, создаваемые движительными установками [2]. Результаты исследований показывают, что использование АПУ дает возможность существенно уменьшить радиус циркуляции судна, повысить эффективность управления курсом и обеспечить более высокую маневренность по сравнению с традиционными движителями, такими как винт фиксированного шага в сочетании с пером руля [3].

Проблема движения судов во льдах и их управляемости является предметом многочисленных исследований как зарубежных, так и российских ученых. Основы теории взаимодействия судна с ледяным покровом заложены в работах, посвященных механике разрушения льда и определению ледового сопротивления судна. Одной из наиболее известных инженерных моделей является полуэмпирическая формула Линдквиста, широко применяемая для оценки ледового сопротивления судов [4]. В России значительный вклад в развитие исследований ледовой ходкости и управляемости судов внесли ученые Крыловского государственного научного центра, такие как К. Е. Сазонов [5], а также А. Н. Зиневич и М. В. Китаев [6], занимавшиеся изучением методов расчета ледового сопротивления и взаимодействия судна со льдом.

Современные исследования направлены на использование численных методов моделирования движения судна во льдах, позволяющих учитывать процессы разрушения ледяного покрова и динамику движения судна в ледовом поле. В ряде работ применяются методы вычислительной гидродинамики и дискретно-элементного моделирования, позволяющие исследовать взаимодействие судна с ледяной средой и прогнозировать маневренные характеристики судна в различных ледовых условиях [7].

Несмотря на значительное количество выполненных исследований проблема управляемости судов, оснащенных азимутальными подруливающими устройствами, при движении в ледовых условиях остается недостаточно изученной. В большинстве существующих работ рассмотрены либо маневренные характеристики судов с АПУ в условиях открытой воды, либо особенности движения судов во льдах без учета специфики работы движителей данного типа. Между тем взаимодействие АПУ с ледяной средой приводит к возникновению сложных гидродинамических и ледовых процессов, оказывающих существенное влияние на управляемость судна.

В связи с этим актуальной научной задачей является исследование управляемости судна, оснащенного азимутальными подруливающими устройствами при движении в ледовых условиях, а также анализ влияния взаимодействия корпуса судна, движителей и ледяного покрова на маневренные характеристики судна.

Методы и результаты (Methods and Results)

Общий вид математической модели судна, оборудованного АПУ и маневрирующего в ледовых условиях. Наиболее надежным способом оценки поведения судна в тех или иных условиях является его математическое моделирование. Архитектура современных судов, оборудованных системой динамического позиционирования, предполагает наличие не менее трех движительных агрегатов, типовая конфигурация которых включает два АПУ и одно НПУ [8, 9]. При составлении математической модели судна, оборудованного указанными движителями, необходимо учитывать воздействие на судно воды (течения) и льда. Наличие плотного ледяного покрова обусловливает интенсивное затухание волновой энергии за счет вязкоупругих характеристик льда. Вследствие этого возникающие волновые нагрузки оказываются пренебрежимо малыми по сравнению с ледовыми силами, течением и упором движительного комплекса. Данное соотношение факторов позволяет исключить волновую составляющую из расчетной схемы, сохраняя при этом требуемую точность и физическую достоверность математической модели.

На основе ранее изложенного математическую модель движения судна в ледовых условиях можно представить в виде следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \Delta\left(\dfrac{dv_{\text{с}}\cos\varphi}{dt} - v_{\text{с}}\cos\varphi\omega_z\right) = T_x - R_{\text{вх}} - R_{\text{тх}} - R_{\text{лх}}; \\ \Delta\left(\dfrac{dv_{\text{с}}\sin\varphi}{dt} - v_{\text{с}}\sin\varphi\omega_z\right) = T_y - R_{\text{ву}} - R_{\text{ту}} - R_{\text{лу}}; \\ I_z\dfrac{d\omega}{dt} = N_{\text{АПУ}} + N_{\text{НПУ}} - N_{\text{в}} - N_{\text{т}} - N_{\text{л}}, \end{cases} \quad (1)$$

где Δ — массовое водоизмещение судна, т;

$v_{\text{с}}$ — скорость судна, м/с;

j — угол между ДП и направлением вектора скорости судна, рад;

ω_z — угловая скорость рыскания, рад/с;

T_x, T_y — проекции тяги движителей, соответственно, на продольную и поперечную плоскости, кН;

$R_{\text{вх}}$, $R_{\text{ву}}$ — проекции силы действия ветра, соответственно, в продольной и поперечной плоскостях, кН;

$R_{\text{тх}}$, $R_{\text{ту}}$ — проекции силы действия течения, соответственно, в продольной и поперечной плоскостях, кН;

$R_{лх}$, $R_{лу}$ — силы сопротивления льда, соответственно, в продольной и поперечной плоскостях, кН;

I_z — момент инерции судна относительно вертикальной оси, т · м^2;

ω — угловая скорость вращения судна вокруг вертикальной оси, рад · с;

$N_{АПУ}$ — момент, создаваемый АПУ, кН · м;

$N_{НПУ}$ — момент, создаваемый НПУ, кН · м;

$N_в$ — момент от действия ветра на судно, кН · м;

$N_т$ — момент от действия течения на судно, кН · м;

$N_л$ — момент от действия сопротивления льда на судно, кН · м.

Момент инерции I_z, являющийся мерой сопротивления корпуса вращению вокруг вертикальной оси z, проходящей через центр тяжести судна, рассчитывается с помощью следующей формулы:

$$I_z = \Delta\left(r_z L_{OA}\right)^2, \tag{3}$$

где r_z — безразмерный радиус инерции относительно вертикальной оси.

L_{OA} — наибольшая длина судна, м.

Радиус инерции определяет меру сопротивления плавучего средства вращательному движению относительно вертикальной оси в процессе рыскания. Увеличение произведения безразмерного радиуса инерции на длину корпуса коррелирует с ростом динамического момента, препятствующего повороту при заданном усилии на пропульсивном комплексе. Локализация массы в центральной части судна минимизирует данное произведение, что существенно повышает его маневренные характеристики и отзывчивость на управляющее воздействие. Напротив, распределение весовой нагрузки к оконечностям приводит к возрастанию инерционных свойств объекта, затрудняя изменение курса и увеличивая время переходных процессов. В табл. 1 приведена зависимость безразмерного радиуса инерции относительно вертикальной оси от типа судна и его дедвейта.

Таблица 1

Зависимость безразмерного радиуса инерции относительно вертикальной оси от типа судна и его дедвейта

Table 1

Dependence of the dimensionless radius of gyration about the vertical axis on vessel type and deadweight

Тип судна	Диапазон дедвейтов, тыс. т	Диапазон значений безразмерного радиуса инерции относительно вертикальной оси
Танкер класса Handymax	15–60	0,25–0,28
Танкер класса Panamax	60–80	0,26–0,29
Танкер класса Aframax	80–120	0,27–0,30
Танкер класса Suezmax	120–160	0,27–0,31
Танкер класса VLCC	160–320	0,28–0,32
Линейный ледокол	1,5–6,0	0,30–0,35
Малотоннажное рыболовное судно	0,03–0,3	0,25–0,27
Траулер	0,3–3,5	0,27–0,30
Морозильный траулер	0,9–4,5	0,27–0,31
Судно PSV (Platform Supply Vessel)	0,5–2,5	0,28–0,33
Судно AHTS (Anchor Handling Tug Supply)	0,8–0,3	0,30–0,35

Таким образом, можно сделать вывод, что ключевыми параметрами, определяющими характер маневрирования во льду, являются структура силового взаимодействия с ледяной средой и величина момента инерции относительно вертикальной оси, отражающая инерционные свойства корпуса.

Действие азимутальных и носовых подруливающих устройств в ледовых условиях. В процессе функционирования системы динамического позиционирования результирующий вектор T_y определяется как векторная сумма тяговых усилий, генерируемых всеми активными пропульсивными единицами судна.

Основное различие между АПУ и НПУ заключается в характере зависимости генерируемого упора от вектора скорости судна. Благодаря конструктивной возможности ориентации вектора тяги в произвольном направлении горизонтальной плоскости величина упора АПУ инвариантна относительно курсового угла движения. Напротив, эффективность НПУ определена направлением перемещения: максимальные значения упора достигаются при работе в траверзном режиме, в то время как при прямолинейном движении судна полезная тяга данного устройства равна нулю.

На основании представленных положений обоснована возможность определения проекций векторов тяги движительных агрегатов на продольную и поперечную плоскости судна. Искомые компоненты сил рассчитываются посредством применения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} T_x = 2T_{\text{АПУ}} \cos\alpha; \\ T_y = 2T_{\text{АПУ}} \sin\alpha + T_{\text{НПУ}}, \end{cases} \tag{3}$$

где $T_{\text{АПУ}}$ — упор АПУ, кН;

$T_{\text{АПУ}}$ — упор НПУ, кН;

α — угол поворота колонки АПУ, рад.

Момент движительного комплекса можно выразить системой уравнений:

$$\begin{cases} N_{\text{АПУ}} = \sum_{i=1}^{2} x_{\text{АПУ}i} T_{\text{АПУ}} \sin\alpha - y_{\text{АПУ}i} T_{\text{АПУ}} \cos\alpha; \\ N_{\text{НПУ}} = x_{\text{НПУ}} T_{\text{НПУ}}, \end{cases} \tag{4}$$

где $x_{\text{АПУ}i}$, $y_{\text{АПУ}i}$, — координаты расположения осей вращения колонок АПУ, м;

$x_{\text{НПУ}}$ — координата расположения туннеля НПУ, м;

Функциональным базисом азимутального подруливающего устройства является гребной винт фиксированного шага. Определение величины упора, генерируемого данным движителем, осуществляется в соответствии с математической зависимостью, представленной в следующей формуле:

$$T_{\text{АПУ}} = \frac{\rho_{\text{в}} \pi D_{\text{ГВ}}^2 H^2 n^2 \left(1 - k_{ice} h\right)}{4}, \tag{5}$$

где $\rho_{\text{в}}$ — плотность воды, т/м^3;

$D_{\text{ГВ}}$ — диаметр гребного винта, м;

H — шаг винта, м;

n — частота вращения гребного винта, об/с;

k_{ice} — коэффициент снижения тяги движителя во льду;

h — толщина льда, м.

При расчете тяги АПУ судна в ледовых условиях необходимо учитывать взаимодействие между гребными винтами и льдом. При работе азимутального движителя в ледовых условиях происходит существенное нарушение стабильности потока, поступающего на гребной винт. Непосредственный контакт лопастей с ледяной крошкой провоцирует усиление кавитационных процессов и возникновение дополнительных вибраций. Значительная доля полезной мощности силовой

установки в этой ситуации расходуется на механическое дробление льда. В результате совокупность данных факторов приводит к заметному снижению пропульсивной эффективности и общей тяги судна. В табл. 2 приведены значения коэффициента снижения тяги движителя во льду от толщины льда [10].

Таблица 2

Зависимость коэффициента снижения тяги движителя во льду от толщины льда

Table 2

Dependence of the Azimuth Thruster Thrust Reduction Coefficient in Ice on Ice Thickness

Характеристика льда	Толщина льда, м	Коэффициент снижения тяги движителя во льду
Серый лед	0,1–0,15	0,03–0,05
Серо-белый лед	0,15–0,3	0,05–0,1
Тонкий однолетний белый лед	0,3–0,7	0,1–0,2
Однолетний лед средней толщины	0,7–1,2	0,2–0,3
Толстый однолетний лед	1,2–2,0	0,3–0,4
Двухлетний лед	2,0–3,0	0,4–0,6
Многолетний лед	3,0	0,6–0,8

Расчет упора носового подруливающего устройства (НПУ) базируется на преодолении силы бокового сопротивления воды при маневрировании. Основная формула тяги зависит от мощности двигателя, диаметра винта и КПД устройства, определяя способность судна поворачиваться на месте или двигаться лагом. Упор НПУ рассчитывается следующим образом:

$$T_{\text{НПУ}} = \sqrt[3]{\frac{\rho \pi D_{\text{т}}^2 P_{sh}^2 \eta^2}{2}}, \tag{6}$$

где $D_{\text{т}}$ — диаметр тоннеля, м;

P_{sh} — мощность на валу, Вт;

η — коэффициент, учитывающий влияние тоннеля на гребной винт (обычно 0,4–0,6).

Современные суда, оборудованные НПУ, все чаще оборудуются защитными решетками [11]. Данное конструктивное решение сводит к минимуму прямое взаимодействие ледовых масс с винтом, расположенным внутри туннеля, что выгодно отличает НПУ от АПУ. Вследствие экранирующего эффекта решеток величина ударных и абразивных нагрузок от льда на лопасти становится пренебрежимо малой, что позволяет исключить фактор ледового воздействия из алгоритмов прочностных и эксплуатационных расчетов для данного типа оборудования.

Из приведенного анализа следует, что ледовое воздействие значительно снижает эффективность азимутальных движителей, требуя учета через коэффициент коррекции тяги, тогда как носовые подруливающие устройства остаются менее уязвимыми благодаря своей защищенности.

Воздействие ветра и течения. Одним из ключевых внешних факторов, определяющих динамику движения судна, является ветровое воздействие. В условиях разреженного или тонкого льда парусность корпуса становится определяющим фактором, способным вызвать значительное отклонение судна от заданного курса. Наличие свободной воды или легко деформируемого ледяного покрова снижает сопротивление среды, ввиду чего ветровое давление начинает оказывать на маневренность судна влияние, сопоставимое с воздействием ледовых сил. Эффективная работа азимутальных подруливающих устройств в таких обстоятельствах требует мгновенного учета вектора ветра для точного удержания судна на траектории. Для вычисления аэродинамических коэффициентов, описывающих силовое воздействие ветра, был применен метод Ишервуда,

согласно которому сила и момент от воздействия ветра на судно рассчитываются с помощью приведенной системы уравнений [12]:

$$\begin{cases} R_{\text{вх}} = 0,5C_{\text{вх}}S_{\text{НМШ}}\left(v_{\text{в}} + v_{\text{с}} + 2v_{\text{в}}v_{\text{с}}\cos q_{\text{в}}\right)\rho_a; \\ R_{\text{ву}} = 0,5C_{\text{ву}}S_{\text{НДП}}\left(v_{\text{в}} + v_{\text{с}} + 2v_{\text{в}}v_{\text{с}}\cos q_{\text{в}}\right)\rho_a; \\ N_{\text{в}} = 0,5C_{\text{в}m}L_{\text{ОА}}\left(v_{\text{в}} + v_{\text{с}} + 2v_{\text{в}}v_{\text{с}}\cos q_{\text{в}}\right)\rho_a, \end{cases} \quad (7)$$

где $C_{\text{вх}}$, $C_{\text{ву}}$ — коэффициенты аэродинамического сопротивления;

$S_{\text{НМШ}}$ — площадь проекции надводной части корпуса судна на мидель шпангоут, м^2;

$S_{\text{НДП}}$ — площадь проекции надводной части корпуса судна на диаметральную плоскость, м^2;

$C_{\text{в}m}$ — коэффициент момента от аэродинамического сопротивления;

$v_{\text{в}}$ — скорость ветра, м/с;

$q_{\text{в}}$ — курсовой угол истинного ветра, град.

ρ_a — плотность воздуха, т/м^3.

Воздействие морского течения характеризует силу сопротивления воды на судно, являясь одним из ключевых внешних факторов, определяющих характер движения и управляемость судна при маневрировании. Корректный учет сил сопротивления воды, обусловленных относительным движением судна и водного потока, является необходимым условием построения адекватной математической модели и достоверной оценки динамики судна.

Для расчета силы воздействия течения необходимо воспользоваться следующей системой уравнений [13]:

$$\begin{cases} R_{mx} = 0,5C_{\text{т}x}S_{\text{ПМШ}}\left(v_{\text{с}}\cos\varphi - v_{\text{т}}\cos\beta\right)^2\rho_{\text{в}}; \\ R_{my} = 0,5C_{\text{т}y}S_{\text{ПДП}}\left(v_{\text{с}}\sin\varphi - v_{\text{т}}\sin\beta\right)^2\rho_{\text{в}}; \\ N_m = 0,5C_{\text{т}m}\rho_2 L_{bp}^2 d\left(v_{\text{с}}\sin\varphi - v_{\text{т}}\sin\beta\right), \end{cases} \quad (8)$$

где $C_{\text{т}x}$, $C_{\text{т}x}$ — коэффициенты гидродинамического сопротивления;

$C_{\text{т}m}$ — коэффициент момента гидродинамического сопротивления;

$S_{\text{ПМШ}}$ — площадь проекции подводной части корпуса судна на мидель шпангоут, м^2;

$S_{\text{ПД}}$— площадь проекции подводной части корпуса судна на диаметральную плоскость, м^2;

$v_{\text{т}}$ — скорость течения относительно грунта, м/с;

β — угол между ДП и направлением течения, рад;

$\rho_{\text{в}}$ — плотность воды, т/м^3;

L_{bp} — длина между перпендикулярами судна, м;

d — осадка судна, м.

В результате рассмотрены основные закономерности формирования сил и моментов, возникающих под воздействием ветра и морского течения на корпус судна. Показано, что корректные расчеты аэродинамического и гидродинамического сопротивления с использованием эмпирических и полуэмпирических зависимостей позволяют обеспечить требуемую точность описания влияния течения на динамику маневрирования.

Воздействие ледовых нагрузок. Для расчета сил сопротивления льда принято использовать эмпирическую формулу В. И. Каштеляна. Данная математическая модель предполагает дифференциацию общего ледового сопротивления на три базовые функциональные составляющие. Первичный компонент данной зависимости характеризует затраты энергии, необходимые для механического разрушения сплошного ледяного покрова в зоне форштевня. Вторая составляющая описывает динамические процессы, связанные с вертикальным перемещением и сдвигом фрагментов разломанного льда вдоль корпуса. Заключительный сегмент формулы учитывает инерционные силы и импульсные взаимодействия, возникающие вследствие непосредственных соударений судна с ледяными образованиями в процессе движения. В публикации В. И. Каштеляна она приведена применительно к прямолинейному движению судна (9) [14]:

$$R_{л} = K_1 h_i B \sigma_f + K_2 h_i^2 \rho_{лi} g B + K_3 h_i B v_{с}, \quad (9)$$

где K_1-K_3 — эмпирические коэффициенты;

h_i — толщина льда, м;

σ_f — прочность льда, кН/м^2;

$\rho_{лi}$ — плотность льда, т/м^3.

Следует отметить, что исходная формула ориентирована на определение ледовой нагрузки исключительно на форштевень. Для повышения точности расчетов и адаптации математической модели к оценке усилий в продольной и поперечной плоскостях необходимо разложить общую силу $R_л$ на составляющие $R_{лx}$ и $R_{лy}$. В данной интерпретации вектор $R_{лx}$ будет характеризовать воздействие на носовую оконечность, тогда как компонент $R_{лy}$ позволит рассчитать давление льда на борт судна. Следовательно, система уравнений будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} R_{лx} = C_1 h_i B \sigma_f + C_2 h_i^2 \rho_i g B + C_3 h_i B \left(v_{с} \cos\varphi\right)^2; \\ R_{лy} = C_4 h_i L_{bp} \sigma_f + C_5 h_i^2 \rho_i g L_{bp} + C_6 h_i L_{bp} \left(v_{с} \sin\varphi\right)^2, \end{cases} \quad (10)$$

где C_1-C_6 — эмпирические коэффициенты;

В публикации [15] представлена функциональная зависимость плотности льда от его температурного режима. При выборе исходных параметров целесообразно ориентироваться на характеристики пресноводного льда, обладающего более высокими прочностными показателями по сравнению с морским. При определении плотности льда допустимо принимать температуру атмосферного воздуха в качестве аппроксимации температуры ледяного покрова. Данное допущение обосновано тем, что в условиях установившегося теплообмена градиент температур между приземным слоем воздуха и верхними слоями однолетнего льда является минимальным.

Учитывая низкую чувствительность плотности льда к температурным колебаниям (вариация составляет менее 0,5 % на интервале в несколько десятков градусов), возникающая вычислительная погрешность признается несущественной для практического применения. Также плотность льда зависит от солености окружающей морской воды. Математическая интерпретация указанной зависимости приведена в следующей формуле:

$$\rho_{лi} = 917 - 0{,}14T + 0{,}814S, \quad (11)$$

где T — температура воздуха, °С;

S — соленость воды, %.

Коэффициенты C_1 и C_4 характеризуют сопротивление разрушению льда при движении в продольной и поперечной плоскостях соответственно. Их физический смысл характеризует силу, необходимую для разрушения льда. В кораблестроении они определяются эмпирическим путем в ледовом бассейне. Данные коэффициенты определяются как отношение измеренного сопротивления разрушению льда к теоретическому и выражаются в системе уравнений:

$$\begin{cases} C_1 = \dfrac{R_{ИСРx}}{h_i B \sigma_f}; \\ C_4 = \dfrac{R_{ИСРy}}{h_i L \sigma_f}, \end{cases} \quad (12)$$

где $R_{ИСРx}$, $R_{ИСРy}$ — измеренные сопротивления разрушению льда в продольной и поперечной плоскостях, кН.

Коэффициенты C_2 и C_5 характеризуют составляющие ледового сопротивления, связанные с подъемом и сдвигом ледяной массы в зоне взаимодействия корпуса судна со льдом.

Их физический смысл заключается в описании силы, необходимой для перемещения фрагментов льда, расположенных на траектории движения судна. Эти коэффициенты учитывают неполное вовлечение ледяного покрова в процесс перемещения, а также тот факт, что в формировании сопротивления участвует не вся длина или ширина корпуса. Таким образом, они корректируют теоретическую оценку усилий, приводя ее в соответствие с реальными условиями взаимодействия. Численно коэффициенты C_2 и C_5 определяются как отношение экспериментально измеренного сопротивления, обусловленного сдвигом (или подъемом) массы льда, к соответствующей теоретической величине. Это отношение выражается в системе уравнений:

$$\begin{cases} C_2 = \dfrac{R_{\text{ИСС}x}}{h_i^2 \rho_i g B}; \\ C_5 = \dfrac{R_{\text{ИСС}y}}{h_i^2 \rho_i g L}, \end{cases} \tag{13}$$

где $R_{\text{ИСС}x}$, $R_{\text{ИССу}}$ — измеренные сопротивления сдвига массы льда, соответственно, в продольной и поперечной плоскостях, кН.

Коэффициенты C_3 и C_6 описывают составляющую ледового сопротивления, обусловленную ударным взаимодействием корпуса судна с ледяным покровом. Их физический смысл заключается в количественной оценке динамической нагрузки, возникающей при столкновении корпуса со льдом в процессе движения. В численном выражении данные коэффициенты определяются как отношение экспериментально зафиксированной силы сопротивления, вызванной динамическим взаимодействием судна со льдом, к соответствующей теоретической оценке этой силы.

Указанное соотношение формализовано в системе уравнений, где коэффициенты выступают в качестве эмпирических параметров модели:

$$\begin{cases} C_3 = \dfrac{R_{\text{ИУС}x}}{h_i B \left(v_{\text{c}} \cos\varphi\right)^2}; \\ C_6 = \dfrac{R_{\text{ИУС}y}}{h_i B \left(v_{\text{c}} \sin\varphi\right)^2}, \end{cases} \tag{14}$$

где $R_{\text{ИУС}x}$, $R_{\text{ИУСу}}$ –– измеренные ударные сопротивления динамического столкновения корпуса со льдом в продольной и поперечной плоскостях, кН.

Момент ледового воздействия на корпус формируется исходя из значений давления и толщины льда в различных точках контакта, а также с учетом геометрических параметров судна, таких как его длина и ширина. Все эти влияния можно выразить с помощью следующего интеграла:

$$N_{\text{л}} = \int_{-L/2}^{L/2} p(x) h B(x) x dx, \tag{15}$$

где $p(x)$ — боковое ледовое давление, кН/м^2.

С учетом того, что боковое ледовое давление и ширина судна могут изменяться в зависимости от длины, численным способом вычисления интеграла (15) является разбитие длины корпуса судна на N участков:

$$N_{ice} = \sum_{i=1}^{N} p(x_i) h_i B(x_i) \frac{L}{N}, \tag{16}$$

где N — количество участков, на которые разбита длина корпуса;

x_i — координата центра i-го участка вдоль корпуса, м.

Таким образом, представленная математическая модель, основанная на методе В. И. Каштеляна, позволяет оценить ледовое сопротивление, разделяя общую нагрузку на такие составляющие, как разрушение льда, отодвигание обломков и динамические удары. Использование проверенных коэффициентов и зависимостей помогает учесть изменчивый характер ледовых воздействий с достаточной для практики точностью. Деление корпуса на отдельные расчетные участки позволяет адаптировать эту модель для оценки маневренности судна в различных ледовых условиях.

Заключение (Conclusion)

В ходе проведенного исследования была разработана комплексная математическая модель управляемости судна, оснащенного азимутальными и носовыми подруливающими устройствами, при маневрировании в ледовых условиях. На основании выполненной работы можно сформулировать следующие основные выводы:

1. Установлено, что эффективность АПУ в ледовых условиях существенно снижается (до 80% в многолетних льдах) из-за взаимодействия лопастей с ледяной крошкой, усиления кавитации и затрат мощности на дробление льда. В то же время НПУ, защищенные решетками, сохраняют стабильность характеристик, что позволяет упростить их учет в прочностных расчетах.

2. Обосновано, что при движении в разреженном или тонком льду ветровые нагрузки по своей величине становятся сопоставимыми с ледовым сопротивлением. Применение метода Ишервуда для расчета аэродинамических коэффициентов позволяет с высокой точностью прогнозировать дрейф корпуса и своевременно корректировать вектор тяги АПУ для удержания судна на курсе.

3. Предложенная модификация модели В. И. Каштеляна, адаптированная для продольного и поперечного перемещения, в сочетании с алгоритмом разбиения корпуса на расчетные участки, обеспечивает подробное описание сил и моментов ледового воздействия при выполнении сложных маневров.

4. Выявлено, что маневренные качества судна (отзывчивость на перекладку АПУ и время переходных процессов) в значительной степени предопределяются распределением его масс, выраженным через безразмерный радиус инерции.

Таким образом, дальнейшие исследования должны быть сосредоточены на комплексном совершенствовании эксплуатационных характеристик судов ледового класса, что включает экспериментальное подтверждение эмпирических коэффициентов в ледовых бассейнах для обводов корпуса современных судов, а также применение методов дискретных элементов для детального численного моделирования взаимодействия потока гребного винта АПУ с ледяным покровом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Propulsion Systems in Marine Navigation / G. Samoilescu, D. Iorgulescu, R. Mitrea, L. D. Cizer // International conference KNOWLEDGE-BASED ORGANIZATION. — 2018. — Vol. 24. — Is. 3. — Pp. 78–82. DOI: 10.1515/kbo-2018-0140.

2. A Numerical Study on Modeling Ship Maneuvering Performance Using Twin Azimuth Thrusters / T. Wu, R. Li, Q. Chen, G. Pi, S. Wan, Q. Liu // Journal of Marine Science and Engineering. — 2023. — Vol. 11. — Is. 11. DOI: 10.3390/jmse11112167.

3. Technical Analysis of Azimuth Thruster and Conventional Systems / S. A. Wicaksono, D. Chrismianto, S. Sunusi, H. Boesono, I. Setiyanto // Indian Journal of Science and Technology. — 2019. — Vol. 12. — Is. 39. — Pp. 1–8. DOI: 10.17485/ijst/2019/v12i39/147589.

4. Lindqvist G. A straightforward method for calculation of ice resistance of ships / G. Lindqvist // POAC 89, 10th Intl Conference, Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 12–16 June 1989. — Vol. 2. Luleaa, Sweden, 1989. — Pp. 722.

5. *Сазонов К. Е.* Развитие ледовой ходкости судов в XXI веке / К. Е. Сазонов // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2018. — № 2(384). — С. 9–28. EDN XSLRLF. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-384-9-28.

6. *Зиневич А. Н.* Сравнительный анализ методов расчета ледовой ходкости ледоколов / А. Н. Зиневич, М. В. Китаев // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. — 2017. — № 2(31). — С. 21–29. EDN WHEJDD. DOI: 10.5281/zenodo.807783.

7. Gu Y., Zhou L. Numerical simulation of ship maneuverability in level ice // Ocean Engineering. — 2022.

8. Numerical simulation of ship maneuverability in level ice considering ice crushing failure / Y. Gu, L. Zhou, S. Ding, X. Tan, J. Gao, M. Zhang // Ocean Engineering. — 2022. — Vol. 251. — Pp. 111110. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111110.

9. *Оськин Д. А.* Математические модели динамики судов, оснащенных винторулевыми колонками / Д. А. Оськин, В. В. Бочарова, С. В. Осипов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. — 2023. — № 3. — С. 124–132. EDN ZDREJJ. DOI: 10.24143/2072-9502-2023-3-126-132.

10. Method to Determine the Propulsion Characteristics of a Ship Moving in Ice / K. Sazonov, G. Kanevskii, A. Klubnichkin, A. Dobrodeev // Journal of Marine Science and Application. — 2025. — Т. 24. — № 3. — С. 532–541. DOI: 10.1007/s11804-025-00667-8.

11. *Ермолаев А. А.* Проблема вибрации подруливающих устройств и способы ее решения / А. А. Ермолаев, С. П. Шевцов // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2018. — № S1. — С. 67–74. EDN VOWKRI. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-S-I-67-74.

12. *Isherwood R. M.* Wind Resistance of Merchant Ships / R. M. Isherwood // Transactions of the Royal Institution of Naval Architects. — 1973. — Vol. 115. — Pp. 327–338.

13. *Sajjan S. C. Sajjan S. C.* Experimental Investigation of Moonpool Shapes on a Ship with Forward Speed / S. C. Sajjan, C. Sharanabasappa, S. Surendran // Annual of Navigation. — 2019. — Vol. 26. — Is. 15. — Pp. 151–162. DOI: 10.1515/aon-2019-0015.

14. *Сахаров А. Н.* Механическая модель взаимодействия дрейфующего льда с протяженным сооружением / А. Н. Сахаров // Морские интеллектуальные технологии. — 2023. — № 3–3(61). — С. 116–121. EDN EEYVAW. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.052.

15. Numerical simulation of ship maneuverability in level ice considering ice crushing failure / Y. Gu, L. Zhou, S. Ding, X. Tan, J. Gao, M. Zhang // Ocean Engineering. — 2022. — Vol. 251. — Pp. 111110. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111110.

REFERENCES

1. Samoilescu, G., D. Iorgulescu, R. Mitrea and L. D. Cizer. “Propulsion Systems in Marine Navigation.” *International conference KNOWLEDGE-BASED ORGANIZATION* 24.3 (2018): 78–82. DOI: 10.1515/kbo-2018-0140.

2. Wu, T., Q. Liu et al. “A Numerical Study on Modeling Ship Maneuvering Performance Using Twin Azimuth Thrusters.” *Journal of Marine Science and Engineering* 11.11 (2023). DOI: 10.3390/jmse11112167.

3. Wicaksono, S. A., I. Setiyanto et al. “Technical Analysis of Azimuth Thruster and Conventional Systems.” *Indian Journal of Science and Technology* 12.39 (2019): 1–8. DOI: 10.17485/ijst/2019/v12i39/147589.

4. Lindqvist G. “A straightforward method for calculation of ice resistance of ships”. *POAC 89, 10th Intl Conference, Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 12-16 June 1989. Vol. 2.* Luleaa, Sweden, 1989.

5. Sazonov, K. E. “Ship ice propulsion performance developments in the xxist century.” *Transactions of The Krylov State Research Centre* 2(384) (2018): 9–28. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-384-9-28.

6. Zinevich, A. N. and M. V. Kitaev. “The comparative analysis of the methods of calculating the icebreaking capability of icebreakers.” *FEFU: School of Engineering Bulletin* 2(31) (2017): 21–29. DOI: 10.5281/zenodo.807783.

7. Gu, Yuchen, and Li Zhou. “Numerical Simulation of Ship Maneuverability in Level Ice.” Ocean Engineering, 2022.

8. Gu, Y., M. Zhang et al. “Numerical simulation of ship maneuverability in level ice considering ice crushing failure.” *Ocean Engineering* 251 (2022): 111110. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111110.

9. Os’kin, D. A., V. V. Bocharova and S. V. Osipov. “Mathematical models of dynamics of vessels equipped with power propellers.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics* 3 (2023): 124–132. DOI: 10.24143/2072-9502-2023-3-126-132.

10. Sazonov, K., G. Kanevskii, A. Klubnichkin and A. Dobrodeev. “Method to Determine the Propulsion Characteristics of a Ship Moving in Ice.” *Journal of Marine Science and Application* 24.3 (2025): 532–541. DOI: 10.1007/s11804-025-00667-8.

11. Ermolaev, A. A. and S. P. Shevtsov. “Thruster vibration problem and solutions.” *Transactions of The Krylov State Research Centre* S1 (2018): 67–74. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-S-I-67-74.

12. Isherwood, R. M. “Wind Resistance of Merchant Ships.” *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects* 115 (1973): 327–338.

13. Sajjan, S. C., C. Sharanabasappa and S. Surendran. “Experimental Investigation of Moonpool Shapes on a Ship with Forward Speed.” *Annual of Navigation* 26.15 (2019): 151–162. DOI: 10.1515/aon-2019-0015.

14. Sakharov, A. N. “Mechanical model of drifted ice interaction of wide offshore structure.” *Marine Intellectual Technologies* 3-3(61) (2023): 116–121. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.052.

15. Gu, Y., M. Zhang et al. “Numerical simulation of ship maneuverability in level ice considering ice crushing failure.” *Ocean Engineering* 251 (2022): 111110. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111110.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Матвиенко Нестор Николаевич —
аспирант,
ФГБОУ ВО «МГУ имени адмирала
Г. И. Невельского»
690003, Российская Федерация,
Приморский край, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, д. 50а.
email: *nestormtv@yandex.ru*

Акмайкин Денис Александрович —
кандидат физико-математических наук, доцент
ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского»
690003, Российская Федерация,
г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50а
e-mail: *akmaykin@msun.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Matvienko, Nestor N. —
postgraduate student
Maritime State University named
after admiral G. I. Nevelskoy
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
Russian Federation
email: *nestormtv@yandex.ru*

Akmaykin, Denis A. —
PhD in Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor
Maritime State University named
after admiral G. I. Nevelskoy
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: *akmaykin@msun.ru*

Статья поступила в редакцию 16 марта 2026 г.
Received: March. 16, 2026.

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

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-436-451 **EDN MQEYBT**

УДК 629.5.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ КРУПНОТОННАЖНОГО СУДОСТРОЕНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА МАЛООБОРОТНЫХ СУДОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В РОССИИ

К. А. Ефросимов[1], Е. О. Ольховик[1], Р. В. Кузнецов[2]

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Представлен обзор текущего состояния российского судостроительного комплекса с акцентом на возможности отечественных верфей по строительству крупнотоннажных судов. Темой работы является исследование критической зависимости отечественных судовых двигателей от импортных и необходимость обеспечения морского национального технологического суверенитета, объектом исследования — судостроительная промышленность России, предметом — производственные мощности ведущих предприятий и возможность создания малооборотных судовых двигателей большой мощности. Целью работы является оценка степени готовности отрасли к крупнотоннажному судостроению и двигателестроению. В процессе проведения исследования были проанализированы открытые источники и стратегические документы, выполнено математическое моделирование проектной мощности по рекомендациям Международной морской организации (IMO), а также проведено сравнение с мировыми лидерами двигателестроения. В результате было выявлено, что количество построечных мест для гражданских судов класса Aframax находится на пределе планов стратегического планирования, физические возможности для постройки судов водоизмещением свыше 100 тыс. т ограничены и требуют модернизации верфей. Отмечается, что отсутствие собственного отечественного производства малооборотных судовых двигателей мощностью более 7 МВт создает системный разрыв ввиду не только невозможности закупки таких двигателей, но и сложности при международной кооперации; импортозамещение главных двигателей требует не только производственных мощностей, но и возрождения инженерных научных школ: технологической, школы расчетов термодинамических и динамических нагрузок и др. Отдельным вызовом является проектирование судов усиленного ледового класса для круглогодичной эксплуатации на Северном морском пути: для таких судов необходима мощность до 45 МВт, которая не может быть обеспечена только одним малооборотным двигателем; при этом установка нескольких таких двигателей является сложной технической задачей по проектированию всего пропульсивного комплекса и единой энергетической установки судна.

Ключевые слова: судостроительная промышленность, крупнотоннажное судостроение, малооборотный двигатель, судовой дизель, производственные мощности, импортозамещение, технологический суверенитет, арктический флот, Северный морской путь, современные геополитические условия.

Для цитирования:
Ефросимов К. А. Современное состояние и перспективы крупнотоннажного судостроения и производства малооборотных судовых двигателей в России / К. А. Ефросимов, Е. О. Ольховик, Р. В. Кузнецов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 3. 436–451. EDN MQEYBT. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-436-451.

CURRENT STATE AND PROSPECTS OF LARGE-TONNAGE SHIPBUILDING AND LOW-SPEED MARINE DIESEL ENGINE PRODUCTION IN RUSSIA

K. A. Efrosimov[1], E. O. Olkhovik[1], R. V. Kuznetsov[2]

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

The article presents an overview of the current state of the Russian shipbuilding industry, with a focus on the capabilities of domestic shipyards to build large-tonnage vessels. The study addresses the critical dependence of Russian shipbuilding and ship propulsion systems on imported marine engines, as well as the need to ensure national technological sovereignty in the maritime sector. The object of the study is the Russian shipbuilding industry, while the subject is the production capacity of leading enterprises and the feasibility of developing high-power low-speed marine engines. The aim of the study is to assess the industry's readiness for large-tonnage shipbuilding and marine engine production. The research is based on the analysis of open sources and strategic documents, mathematical modelling of the required propulsion power in accordance with the recommendations of the International Maritime Organization (IMO), and comparison with the world's leading marine engine manufacturers. The results show that the number of building berths suitable for Aframax-class commercial vessels is close to the limits set in strategic planning documents, while the physical capacity to build vessels with a displacement of more than 100,000 tonnes remains limited and requires shipyard modernization. The absence of domestic production of low-speed marine engines with a power output exceeding 7 MW creates a systemic gap caused not only by the impossibility of purchasing such engines, but also by the difficulties associated with international industrial cooperation. Import substitution of main engines requires not only production facilities, but also the revival of engineering research schools, including technological schools and schools specializing in the calculation of thermodynamic and dynamic loads. A separate challenge is the design of ice-strengthened vessels for year-round operation on the Northern Sea Route. Such vessels require power output of up to 45 MW, which cannot be provided by a single low-speed engine. At the same time, the installation of several such engines is a complex technical task that involves the design of the entire propulsion system and an integrated ship power plant.

Keywords: shipbuilding industry, large-tonnage shipbuilding, low-speed marine engine, marine diesel engine, production capacity, import substitution, technological sovereignty, Arctic fleet, Northern Sea Route, current geopolitical conditions.

For citation:
Efrosimov, Kirill A., E. O. Olkhovik and R. V. Kuznetsov. "Current state and prospects of large-tonnage shipbuilding and low-speed marine diesel engine production in Russia." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.3 (2026): 436–451. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-436-451.

Введение (Introduction)

Российская судостроительная промышленность является одной из ключевых отраслей, обеспечивающих национальные интересы. В современных геополитических условиях строительство крупнотоннажных транспортных судов является стратегической необходимостью для обеспечения технологического суверенитета. При этом существует критическая зависимость от импортных главных двигателей.

Анализ публикаций показывает, что ведущие мировые производители судовых двигателей (*MAN ES, WinGD, J-ENG*) занимают монопольное положение. Российские исследования [1, 2] подтверждают необходимость создания отечественных малооборотных двигателей для крупнотоннажного флота. Главная проблема заключается в полной остановке производства малооборотных двигателей в России после 2015 г. Отсутствуют современные научные школы двухтактного дизелестроения, адаптированные к экологическим требованиям *IMO Tier* III и арктическим условиям. Не решены задачи расчета нестационарных винтовых характеристик и долговечности клапанного узла при работе на тяжелых топливах.

Цель работы — дать объективную оценку возможностей ведущих судостроительных предприятий России по строительству крупнотоннажных гражданских судов и проанализировать степень готовности отечественной промышленности к производству малооборотных судовых двигателей большой мощности.

Задачи исследования:

– анализ производственных мощностей верфей, в том числе количества построечных мест;
– выявление технологических ограничений при производстве малооборотных судовых двигателей;
– определение необходимых условий для достижения технологического суверенитета в крупнотоннажном морском судостроении, включая арктический флот для круглогодичной эксплуатации на Северном морском пути (СМП).

Методы и материалы (Methods and Materials)

В работе использованы методы анализа открытых источников данных (отчеты ОСК, стратегии развития судостроения, данные государственных программ), аналитических обзоров и официальных документов стратегического планирования. Применены математические модели для расчета потребной мощности энергетической установки согласно резолюциям IMO MEPC.232(65) и MEPC.262(68). Проведен сравнительный анализ характеристик современных малооборотных двигателей *MAN B&W* и *WinGD*. Использованы данные о производственных мощностях судостроительных заводов (ССК «Звезда», Балтийский завод, Адмиралтейские верфи и др.), полученные из официальных источников.

Судостроительный комплекс России является интегрированной системой, объединяющей значительное количество организаций различного профиля. Всего на начало 2025 г. в сфере судостроения, судоремонта и смежного инжиниринга осуществляют деятельность порядка 440 организаций, включая 220 судостроительных и судоремонтных заводов, а также 88 научных, проектных и инжиниринговых компаний, что подчеркивает высокий интеллектуальный капитал сектора. Отрасль отличается высокой степенью территориальной концентрации: на долю Северо-Западного макрорегиона приходится 69,8 % всего объема производства судостроительной продукции, здесь также сконцентрирована подавляющая часть высококвалифицированных кадров (61,1 %)[1].

В сегменте гражданского судостроения под руководством Объединенной судостроительной корпорации в 2024 г. было заложено 17 новых судов, спущено на воду 24 судна и передано заказчику 18 судов. Всего на различных стадиях строительства находилось более 120 гражданских судов[2]. В целом ситуация в отрасли остается сложной. Генеральный директор ЦНИИМФ С. Буянов на конференции «Океанский морской флот. *Made in Russia*» отметил, что на начало 2025 г. транспортный флот России насчитывает 1 277 судов суммарным дедвейтом 13,2 млн т. Однако текущее состояние гражданского и промыслового флота характеризуется критическим уровнем износа: более 70 % судов превышают 30-летний возраст, что создает риски для транспортной и энергетической безопасности [3].

Развитие Трансарктического транспортного коридора ставит новые задачи по созданию ледокольного и транспортного флота [4] для работы в акватории СМП [5]. Существующие судостроительные мощности Российской Федерации, обладающие необходимыми технологическими возможностями постройки крупнотоннажного арктического флота, в настоящее время ограничены АО «Балтийский завод» (Санкт-Петербург) и ССК «Звезда» (Приморский край, Большой Камень), которые работают на пределе своих возможностей, что не позволяет нарастить темпы постройки судов[3]. Карта крупнейших судостроительных предприятий представлена на рис. 1. Сводная информация по крупнейшим верфям представлена в табл. 1.

АО «Севмаш» (г. Северодвинск) — крупнейший в России судостроительный комплекс, обладающий уникальными производственными возможностями. Основной специализацией является строительство атомных подводных лодок для ВМФ, при этом предприятие располагает крупнейшими в стране стапельными местами в крытых эллингах, что позволяет строить суда водоизмещением до 100 тыс. т.

Балтийский завод (г. Санкт-Петербург). Является одним из ведущих производителей крупнотоннажных судов. Располагает тремя построечными местами: двумя стапелями и крытым эллингом. Стапель «А» Балтийского завода длиной 350 м является самым большим в России,

[1] Судостроение России: Анализ [Электронный ресурс] / Данные Московской области: Режим доступа : https://mosregdata.ru/article/russia-shipbuilding-analysis (дата обращения: 13.04.2026).

[2] Стоимость сданных проектов в отрасли сократилась за год [Электронный ресурс] / Коммерсантъ: Режим доступа : https://www.kommersant.ru/doc/7497428 (дата обращения: 13.04.2026).

[3] Отечественных судостроительных мощностей России недостаточно для строительства торгового флота для Арктики [Электронный ресурс] / PortNews.Режим доступа: https://portnews.ru/news/375181/ (дата обращения: 13.04.2026).

позволяя строить и спускать на воду суда дедвейтом до 45 тыс. т. Предприятие также обладает уникальной компетенцией в области производства крупных гребных винтов весом до 70 т и диаметром до 8 м[4].

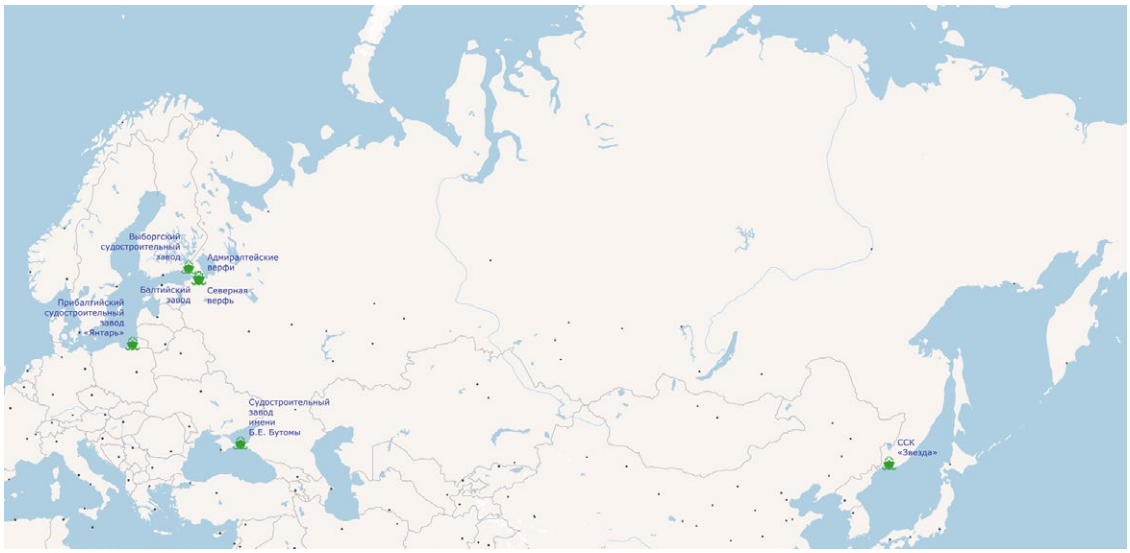


Рис. 1. География судостроительных предприятий России, обладающих потенциалом для строительства крупнотоннажного морского флота
Fig. 1. Geographic Distribution of Russian Shipbuilding Enterprises Capable of Large-Tonnage Seagoing Vessel Construction

Таблица 1

Судостроительные предприятия России, имеющие мощности для крупнотоннажного строительства судов

Table 1

Russian shipbuilding enterprises with facilities for the construction of large-tonnage vessels

Судостроительный завод, верфь	Основные типы строящихся судов (выше 5 тыс. водоизмещения)	Водоизмещение судов до, тыс. т	Тип энергетической установки	Ориентир. мощность ЭУ, МВт	Возможности завода по водоизмещ. тыс. тонн
1	2	3	4	5	6
Судостроительный комплекс «Звезда»	Танкеры Aframax	114	Двухтопливная энергетическая установка	16,7 (ГД)	350
	Газовозы СПГ	81	Дизель-генераторы, ВРК	45 (3 x 15)	
	Атомные ледоколы	71, 38	Атомная установка	315 x 2	
Балтийский завод	Атомные ледоколы	33,54	Атомная установка	60	45
	Суда ледового класса	22,25	Дизель-электрическая	25	
	Плавучий энергоблок	21,50	Атомная установка	60	

[4] О заводе [Электронный ресурс] / АО Балтийский завод. Режим доступа: https://www.bz.ru/ (дата обращения: 13.04.2026).

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6
Северная верфь	Фрегаты	5,4	Дизель-газотурбинная установка	7,6(40,6)	12
	Траулеры	5,5	Среднеоборотные дизели	6,2	
Адмиралтейские верфи	Научные суда	25,3	Дизель-генераторы, ВРК	22,5	70
Выборгский судостроительный завод	Ледоколы Суда снабжения	14,3	Среднеоборотные дизели	18	15
Прибалтийский судостроительный завод «Янтарь»	Рыболовные судна	15	Среднеоборотные дизели	10,5	15

ССК «Звезда» (г. Большой Камень, Приморский край) — первая российская судостроительная верфь, изначально предназначенная для крупнотоннажного судостроения. Предприятие располагает самым большим в России сухим доком размерами 491 × 114 × 14 м, позволяющим строить суда водоизмещением до 350 тыс. т. По состоянию на 2026 г. текущие мощности верфи обеспечивают темп сдачи 3–4 крупнотоннажных судна в год, однако после выхода на проектную мощность планируется сдавать порядка 10–12 судов[5].

АО «Адмиралтейские верфи» — старейшее судостроительное предприятие России, основанное 5 ноября 1704 г.[6] Императором Петром I. В сфере военного кораблестроения верфь является ведущим предприятием по проектированию и строительству неатомных подводных лодок. В сфере гражданского судостроения предприятие специализируется на постройке танкеров дедвейтом до 70 000 т, в том числе усиленного ледового класса. Производственные мощности верфи, включая два открытых наклонных стапеля, пять крытых эллингов и два плавучих дока, позволяют строить суда дедвейтом до 70 000 т, длиной до 260 м и шириной до 34 м. В структуре предприятия собственный инженерный центр, а также корпусное, сборочно-сварочное, машиностроительное и стапельно-сдаточное производства[7]. В 2025 г. запущена программа модернизации, по завершении которой предприятие сможет одновременно строить несколько крупнотоннажных танкеров типа *Aframax* дедвейтом 80 000–120 000 т [6], предназначенных для круглогодичной перевозки нефти по СМП.

В рамках стратегических планов государства ведется работа по наращиванию производственных мощностей и созданию новых хабов крупнотоннажного судостроения. Так, в 2025 г. ОСК анонсировала масштабную программу модернизации АО «Северная верфь» (г. Санкт-Петербург). Общий объем инвестиций, может составить не менее 300 млрд руб[8]. В результате модернизации, которую планируется завершить к 2030 г., завод должен увеличить свои операционные возможности, получив способность строить суда размером до 350 × 60 м, включая танкеры типа *Aframax*, газовозы, контейнеровозы и балкеры. Объем переработки металла должен достигнуть 90 тыс. т в год, а производительность верфи, по оценкам специалистов, вырастет

[5] О предприятии [Электронный ресурс] / Дальневосточный завод Звезда. Режим доступа: https://dvzz.ru/about/ (дата обращения: 13.04.2026).

[6] Адмиралтейские верфи [Электронный ресурс] / Большая российская энциклопедия: научно-образовательный портал.Режим доступа: https://bigenc.ru/c/admiralteiskie-verfi-712093/?v=3824667 (дата обращения: 13.04.2026).

[7] Адмиралтейские верфи [Электронный ресурс] / Правительство Российской Федерации. Архив сайта председателя правительства РФ В. В. Путина 2008-2012.Режим доступа: http://archive.premier.gov.ru/pda/visits/ru/6037/info/1488/ (дата обращения: 13.04.2026).

[8] В создание новой верфи в Петербурге вложат 300 млрд рублей [Электронный ресурс] / ТАСС.Режим доступа: https://tass.ru/ekonomika/24281195 (дата обращения: 24.04.2026).

в 15–16 раз, что позволит сдавать до 11 средне- и крупнотоннажных судов ежегодно. Параллельно с этим «Стратегией развития судостроительной промышленности РФ», актуализированной в мае 2025 г., предусмотрено дальнейшее интенсивное развитие отрасли. К 2036 г. планируется увеличить загрузку действующих мощностей до 61 %, а к 2050 г. — до 73 %. Одним из приоритетных направлений является строительство флота для работы на маршрутах СМП: к 2036 г. количество судов, эксплуатирующихся на этой линии, должно быть увеличено до 51, а к 2050 г. — до 135.

Следует отметить, что большинство заводов отрасли, изначально адаптированных под задачи военного кораблестроения, постепенно переориентировались на решение задач гражданского судостроения. Однако они, как правило, удовлетворяют потребности в малотоннажных судах и лишь частично — в среднетоннажных транспортных судах. Также Правительство России в конце 2025 г. актуализировало «Перспективный план гражданского судостроения на период до 2038 г.» (далее — Перспективный план), который включает чуть более 2 тыс. судов различного назначения, при этом устойчивое финансирование будет обеспечено не более чем 1/3 из общего количества[9]. Для работы только на СМП в Перспективном плане заложено более 100 судов высокого ледового класса. Если рассматривать перспективный план с разбивкой по основным типам судов, то можно сделать вывод, что по каждому проекту планируется постройка серии от 40 до 80 судов каждого типа.

Наиболее уязвимым и критичным звеном в процессе создания крупнотоннажного торгового флота является отсутствие собственного современного производства судовых главных двигателей. Согласно мнению экспертов, основной проблемой в данном случае является невозможность приобретения готовых силовых установок за рубежом. После введения санкций в 2022 г. ведущие мировые производители судовых двигателей, включая немецкую фирму *MAN*, финскую *Wärtsilä,* американские *Rolls-Royce* и *Twin Disc* прекратили поставки своей продукции в Россию. Азиатские производители, выпускающие двигатели по лицензии указанных фирм, также избегают сотрудничества, опасаясь вторичных санкционных рисков. Из этого следует, что необходимость проведения мероприятий по импортозамещению в судостроении продиктована не столько возможностью получения экономической выгоды, сколько соображениями национальной безопасности [7].

Строительство крупных торговых судов в России было определено в качестве одной из приоритетных задач ОСК, для выполнения которой было заявлено о крайней необходимости организации собственного производства главных энергетических установок, так как создавшаяся ситуация полного отсутствия в России собственного производства подобных силовых установок приобрела особую актуальность в контексте необходимости форсированного развития двигателестроения мощностью более 7 МВт.

Результаты (Results)

Оценка мощности и количества судовых двигателей. Оценка мощности и количества двигателей является приоритетной задачей при проектировании крупнотоннажного судна. Для оценки мощности энергетической установки судна используется формула (1), введенная IMO Резолюцией MEPC.232(65) [8] и поправками к MEPC.262(68) [8], согласно которой определяется потребная мощность энергетической установки судна:

$$Minimum\ Power\ Line\ Value = a\left(DWT\right) + b, \tag{1}$$

где a и b — коэффициенты для расчета минимальной мощности (указаны в табл. 2);

DWT — дедвейт, т (для контейнеровозов это значение умножается на 3–5 раз из-за увеличенной скорости).

[9] План гражданского судостроения до 2038 года обеспечен средствами лишь на треть [Электронный ресурс] // Ведомости. Режим доступа: https://www.vedomosti.ru/business/articles/2025/12/23/1165527-plan-grazhdanskogo-sudostroeniya (дата обращения: 13.04.2026).

Таблица 2

Коэффициенты для расчета минимальной мощности СЭУ [8]

Table 2

Coefficients for Calculating the Minimum Required Power of the Ship Power Plant [8]

Тип судна	*a*	*b*
Сухогруз, водоизмещением менее 145 000 т	0,0763	3374,3
Сухогруз, водоизмещением, более 145 000 т	0,0490	7329,0
Танкер	0,0652	5960,2

Полученная зависимость представлена на рис. 2. Из графика видно, что при строительстве газовозов и танкеров водоизмещением до 120 тыс. т необходимы СЭУ более 10 МВт.

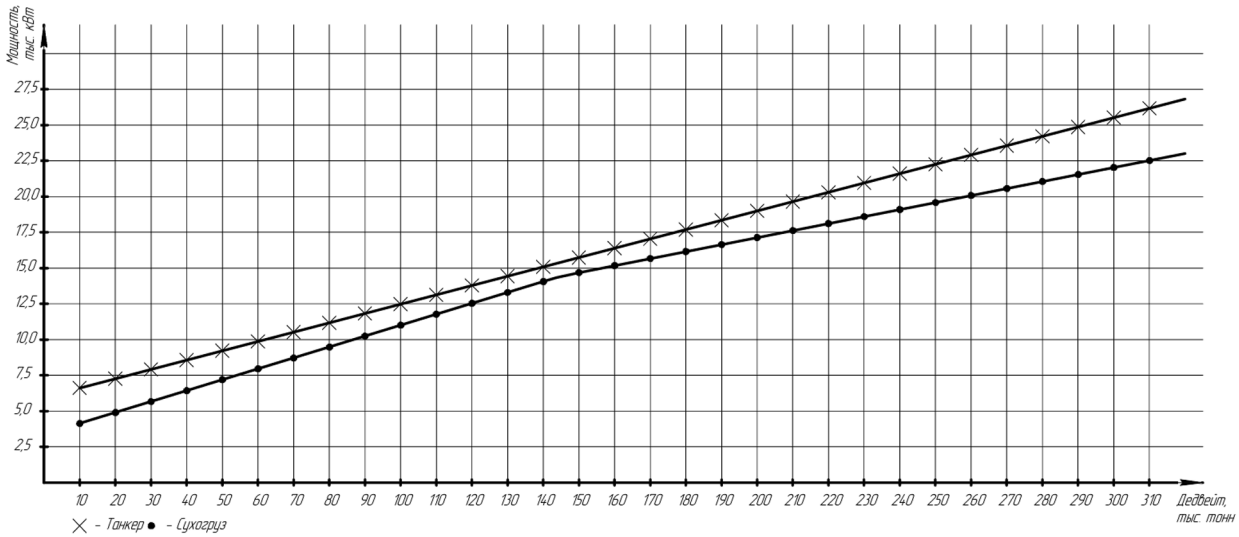


Рис. 2. Зависимость проектной мощности СЭУ от дедвейта
Fig. 2. Relationship between Ship Power Plant Design Power and Deadweight

В связи с ускоренным развитием СМП необходимо учитывать ледопроходимость. Формула для расчета эксплуатационной мощности судна, способного работать в условиях обледенения [9], следующая:

$$N_e = \frac{D_c^{\frac{2}{3}} v^3}{c\eta}, \tag{2}$$

где D_c — водоизмещение судна, т;

v — максимально развиваемая скорость движения судна, уз;

c — коэффициент, зависящий от обводов судна и его главных размеров;

η — пропульсивный коэффициент.

Более точные методы прогнозирования, учитывающие нестационарные винтовые характеристики и ледовые нагрузки, предложены в работе [6], где с помощью групп метакогнитивных моделей достигнута ошибка прогноза 2–5 %.

При анализе маршрута Сабетта – бухта Бечевинская [10] была использована формула (2). Сделаны следующие выводы: средними значениями мощности привода корабля являются 20770 кВт без ледовой нагрузки и 22777 кВт при ледовой нагрузке, при выборе СЭУ следует учесть, что максимальная потребляемая мощность при ледовой нагрузке составляет 45000 кВт. Это обуславливает необходимость проектирования СЭУ высокой мощности, так как для северных морских

широт России наличие обледенелости обуславливает соответствующее увеличении мощности СЭУ по сравнению с более теплыми регионами. Тем самым повышается удельный расход топлива и затраты на совершение рейса. В работе [2] авторы приходят к аналогичному заключению, сделав вывод, что минимальный порог мощности для судов с ледокольной формой носа составляет 35–40 МВт. Для судов с обычной («умеренной») формой носа при движении в тяжелых льдах потребная мощность возрастает до 60 МВт и более.

Выбор в пользу малооборотного двигателя, типовая конструкция которого приведена на рис. 3, для крупнотоннажных судов обусловлен их неоспоримыми эксплуатационными преимуществами, главным из которых является высокая топливная экономичность по сравнению со среднеоборотными двигателями. Кроме того, вследствие увеличенных геометрических размеров цилиндра при равном рабочем объеме малооборотный двигатель характеризуется, как правило, меньшим числом цилиндров по сравнению со среднеоборотным. Это обусловливает сокращение количества подвижных элементов, что, в свою очередь, обеспечивает более высокую общую надежность и повышенный ресурс конструкции. Несмотря на габариты, при сравнении с другим перспективным типом СЭУ — паротурбинной установкой, они занимают меньшие габариты [11].

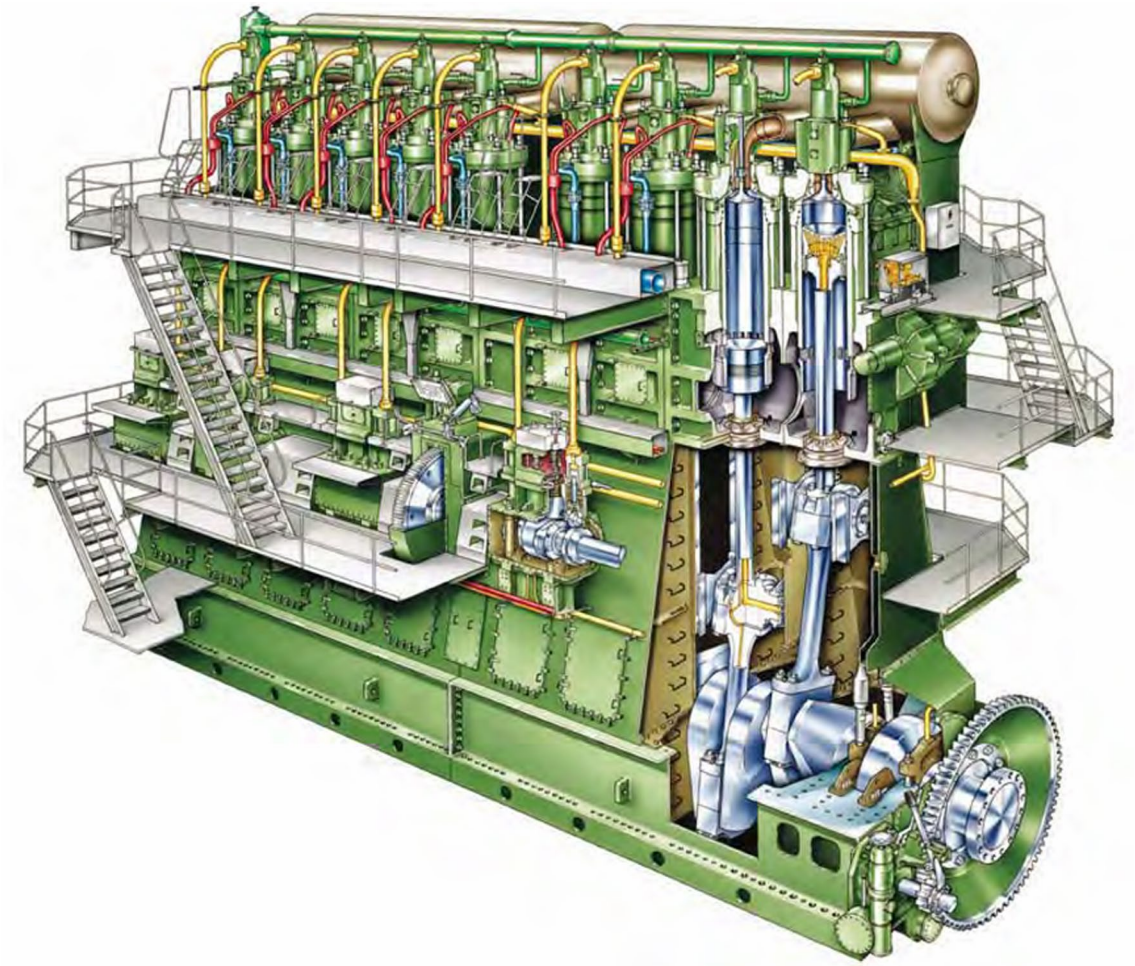


Рис. 3. Общий вид типичной конструкции малооборотного двухтактного двигателя [12]
Fig. 3. General Arrangement of a Typical Low-Speed Two-Stroke Engine [12]

На фоне совокупности характерных преимуществ малооборотных крейцкопфных двухтактных двигателей их недостатки (большая масса, высокая начальная стоимость, увеличенные габариты и потребность в объеме машинного отделения) становятся менее существенными в том случае, если судовая энергетическая установка рассматривается интегрально, а не как набор обособленных элементов, включая непосредственно двигатель.

Малооборотные двухтактные крейцкопфные двигатели обладают среди прочих тепловых двигателей самым высоким КПД, который превышает 50–52 % и в перспективе может приблизиться к 55 % при удельном эффективном расходе топлива до 165 г/кВт·ч. Малая частота вращения коленчатого вала позволяет использовать прямую передачу мощности на движитель, минимизируя потери. Благодаря возможности работы на самых дешевых сортах топлива с достижением ресурсных показателей до 180 000 ч, двигатель является привлекательным для операторов торгового флота [1]. Также необходимые мощности можно получить, используя дизель-газотурбинную установку типа *CODAG* или *CODOG*; однако такие схемы больше подходят для обеспечения кратковременного форсажа (при работе газотурбинного двигателя) и длительного экономичного режима при работе дизеля [13], что не подходит для работы большого судна.

Необходимо отметить, что определенная техническая база в области малооборотного двигателестроения в России существует, однако она не является современной. Брянский машиностроительный завод (БМЗ) с 1961 г. занимался выпуском двухтактных малооборотных судовых двигателей по лицензии компании *MAN B&W Diesel A/S* (Дания), являясь одним из крупнейших в Европе и единственным на постсоветском пространстве их производителем. Продукция БМЗ, в частности двигатели семейства МС-С, в том числе модель ДБ70 (7S50MC-C), обладала высокими эксплуатационными характеристиками и использовалась на судах под флагами 30 стран мира. Однако к 2015 г. производство этих двигателей на БМЗ было полностью остановлено [14].

В 2024 г. в Правительстве Российской Федерации началось обсуждение перспектив создания отечественного производства судовых малооборотных двигателей мощностью 10–12 МВт, необходимых для крупнотоннажного судостроения[10]. ГК «Синара» может стать партнером государства. Предполагается, что общий объем инвестиций в проект может составить до 190 млрд руб.[11]

С целью преодоления технологической зависимости объединенной судостроительной корпорацией (ОСК) инициирован масштабный проект по возрождению отечественного малооборотного двигателестроения. Ключевым шагом явилось приобретение ОСК Кингисеппского машиностроительного завода (КМЗ).

По состоянию на середину 2025 г. решения ОСК и Правительства РФ были направлены на то, чтобы сделать КМЗ базовой площадкой для производства малооборотных двигателей большой мощности. Управляющий директор КМЗ М. Даниленко в июне 2025 г. заявил, что на разработку и постановку на производство судовых малооборотных двигателей для крупнотоннажного флота потребуется примерно 3,5 года. Однако в динамично меняющихся условиях планы корпорации корректируются. В начале 2026 г. появилась информация о том, что ОСК планирует проводить крупноузловую сборку и испытания малооборотных двигателей на Пролетарском заводе в Санкт-Петербурге. При этом Кингисеппский МСЗ остается в роли технологического партнера. В рамках первого этапа проекта, о завершении которого корпорация официально сообщила в январе 2026 г., было сформировано специализированное конструкторское бюро и завершена предпроектная проработка линейки МОД мощностью 5–15 МВт[12].

Анализ данных мирового рынка МОД. Мировой рынок малооборотных судовых двигателей является одним из наиболее монополизированных сегментов промышленности. Производственные мощности по их выпуску сконцентрированы всего в нескольких странах: Китае, Южной Корее и Японии, на долю которых приходится более 99 % мирового выпуска (в 2022 г. —

[10] В России планируется создать производство судовых малооборотных двигателей для крупнотоннажного судостроения[Электронныйресурс]/Нефтегаз.ру.Режимдоступа:https://neftegaz.ru/news/Suda-i-sudostroenie/818427-v-rossii-planiruetsya-sozdat-proizvodstvo-sudovykh-malooborotnykh-dvigateley-dlya-krupnotonnazhnogo-/ (дата обращения: 13.04.2026).

[11] Большому кораблю — большой двигатель [Электронный ресурс] / Коммерсантъ. Режим доступа: https://www.kommersant.ru/doc/6508708 (дата обращения: 13.04.2026).

[12] Пролетарский завод ОСК займётся крупноузловой сборкой судовых малооборотных двигателей [Электронный ресурс] / Sudostroenie Info. Режим доступа: https://sudostroenie.info/mobver/novosti/47179.html (дата обращения: 13.04.2026).

48,1 %, 29,7 % и 22,0 % соответственно). При этом реальное производство в этих странах осуществляется по лицензиям крайне ограниченного числа компаний-патентодержателей.

Олигополию на технологическом уровне образуют три основных бренда: немецко-датская *MAN ES*, швейцарская *WinGD* (дочернее предприятие китайской государственной судостроительной корпорации) и японская *Japan Engine Corporation (J-ENG*)

MAN Energy Solutions — немецко-датская компания, которая предлагает широкую линейку двухтактных двигателей *MAN B&W*. В зависимости от исполнения (от *MAN B&W* серия 35–95) мощность варьируется в диапазоне 4 350–82 440 кВт при частоте вращения 56–167 об/мин. Серия *MAN B&W ME-C* на основе электронного управления обеспечивает полную топливную гибкость, позволяя использовать метанол (сжиженный природный газ), а с 2025 г. — аммиак[13], что особенно важно при вопросе строительства российского газового флота.

WinGD (*Winterthur Gas & Diesel*) — швейцарская компания, принадлежащая китайской государственной судостроительной корпорации *CSSC*, занимающая второе место по объему выпуска двухтактных лицензионных двигателей. Флагманский продукт — малооборотные двухтактные двухтопливные двигатели *X-DF*. Например, модель *X92DF-M-1.0*, предназначенная для крупных и сверхкрупных контейнеровозов, имеет диаметр цилиндра 920 мм и мощность 24 420–77 400 кВт в диапазоне частот вращения 70–80 об/мин[14]. Данные двигатели могут работать на дизельном топливе, метаноле и этаноле, что представляет особый интерес для развития экологичного флота. Сравнительные характеристики передовых малооборотных двигателей *MAN* и *WinGD* представлены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнительная характеристика двухтактных малооборотных двигателей

Table 3

Comparative Characteristics of Low-Speed Two-Stroke Marine Engines

Параметр	Модель двигателя	
	MAN B&W (серии 35–95)[13]	*WinGD X92DF-M-1.0*[14]
Диапазон мощности, МВт	4,35–82,44	24,42–77,40
Частота вращения, об/мин	56–167	70–80
Диаметр цилиндра, мм	350–950	920
Ход поршня, мм	Варьируется	3468
Топливная гибкость	*HFO*, *LNG*, метанол, аммиак	*HFO*, *LNG*, метанол, аммиак

Таким образом, необходимо восстановление производственно-технологической цепочки создания отечественных судовых двухтопливных дизелей с учетом современных требований.

Научно-технические аспекты и перспективы развития. При изучении научно-технического аспекта проблемы следует отметить, что в марте 2025 г. между ОСК в лице Центра продуктовой специализации «ОСК-Движение» и Инжиниринговым центром «Кронштадт» был подписан первый контракт в рамках проекта по созданию линейки отечественных судовых малооборотных двигателей. Это событие знаменует переход проекта в практическую плоскость закупки и внедрение специализированных инжиниринговых услуг.

Полный цикл воссоздания технологии является амбициозной задачей, требующей не только производственных мощностей, но и возрождения научной школы отечественного дизелестроения. Таким образом, проект ОСК имеет стратегическое значение, выходящее за рамки отдельно взятой

[13] Leading the way in sustainable two-stroke propulsion [Электронный ресурс] / Everllence. Режим доступа: https://man-es.com/marine/products/two-stroke-engines/webinar (дата обращения: 13.04.2026).

[14] The biggest two-stroke dual-fuel engine, designed for modern large and ultra large container vessels [Электронный ресурс] / WinGD.Режим доступа: https://win-gd.com/products-solutions/engines/x92df-m-10 (дата обращения: 13.04.2026).

корпорации, поскольку определяет возможность дальнейшего существования крупнотоннажного гражданского судостроения. Сроки, закладываемые ОСК для проектирования и производства отечественных малооборотных двигателей (МОД), представлены в табл. 4.

Таблица 4

Этапы реализации проектирования и производства отечественных малооборотных двигателей

Table 4

Stages in the Design and Production of Domestic Low-Speed Engines

Этап	Сроки реализации / статус	Содержание работ
Предпроектная проработка	Завершена в 2025 г.	Формирование конструкторского бюро, определение технического облика МОД
Разработка РКД	В процессе (2026–2027 гг.)	Разработка рабочей конструкторской документации, привлечение инжиниринговых партнеров
Организация производства	2026–2028 гг.	Подготовка площадок КМЗ и Пролетарского завода, приобретение оборудования
Выпуск первого МОД	2027–2028 гг. (план)	Завершение создания опытного образца, начало серийного выпуска

Современный процесс создания МОД требует возрождения конструкторской школы в области двухтактного дизелестроения с учетом ужесточающихся экологических требований IMO Tier III, которые могут быть обеспечены при использовании двухтопливных технологий сжигания газового топлива. По мнению авторов [15], требования IMO Tier III по NO_x и SO_x уже невозможно выполнить используя только нефтяные топлива (мазут и низкосернистое топливо). Очевидным решением является переход на более экологичные виды топлива, в первую очередь — природный газ. Это подтверждает стратегическую правильность планов ОСК по созданию двухтопливных МОД для крупнотоннажного флота, включая газовозы и танкеры.

Как показано в работе [15], при переходе с жидкого топлива на газожидкостное максимальное давление сгорания в цилиндре малооборотного двигателя возрастает с 104,7 до 172,7 бар, а степень повышения давления $\lambda = P_z/P_c$ увеличивается с 1,14 до 2,02. Это означает, что работа на газе сопровождается значительно более жестким рабочим циклом, близким к циклу Отто, и повышенными механическими нагрузками на цилиндропоршневую группу и кривошипно-шатунный механизм. Следовательно, при создании отечественного двухтопливного МОД необходимо не только воспроизвести конструкцию, но и обеспечить соответствующий запас прочности деталей, а также адаптировать систему управления для ограничения скорости нарастания давления. Из этого сделан вывод о том, что научные аспекты этой проблемы заключаются в необходимости выполнения сложных термодинамических расчетов для достижения минимального уровня эмиссии вредных веществ, причем критически важным является проведение испытаний и верификация проектных решений.

Помимо возрождения инженерной школы дизелестроения, важнейшим фактором ускорения разработки отечественных малооборотных двигателей является внедрение методов предиктивного моделирования. В работе [6] предложена методология «Единая линия проектирования», объединяющая онтологическое описание, многоуровневые модели (0D–3D) и ансамбли метакогнитивных моделей на основе байесовского стекинга. Такой подход позволяет прогнозировать КПД установки с ошибкой менее 2 %, а выбросы CO_2 — менее 5 %, что является критически важным для обоснования проектных решений при ограниченном объеме натурных испытаний.

В настоящее время ведется интенсивный поиск новых конструктивных схем преобразующих механизмов ДВС, которые смогут исключить недостатки, присущие КШМ. Интерес представляет схема бескривошипно-шатунного механизма ДВС, в котором крутящий момент на валу

зависит только от давления газов в цилиндре. Применение этого механизма приводит к увеличению крутящего момента на 25–35 %, а следовательно, к увеличению мощности и улучшению топливной экономичности двигателя [16].

Создание МОД большой мощности — это не только «отливка блока цилиндров», но и решение сложных задач динамики и вибронадежности. Как отмечают авторы [17], работа малооборотного двигателя на судне сопровождается широким спектром возмущающих моментов — от 1-го до главного порядка, равного числу цилиндров. Неучет этих нагрузок на стадии проектирования приводит к резонансным колебаниям упругих систем «двигатель – корпус», усталостным трещинам, повышенному износу пар трения и фреттинг-коррозии валопроводов. Также существует расхождение с теорией при проектировании.

Как показано в работе [18], результаты ходовых испытаний крупнотоннажных судов с МОД свидетельствуют о систематическом отклонении фактической винтовой характеристики от типовой кубической зависимости:

$$N_e \infty n^3 . \tag{3}$$

Для реальных судов показатель степени (m) варьируется в пределах 2,8–3,5 в зависимости от типа судна и условий плавания. Это приводит к нарушению автомодельности между частотой вращения двигателя и скоростью судна, создавая условия для перегрузки главного двигателя. Следовательно, при создании отечественного МОД необходимо не только воспроизвести двигатель, но и адаптировать систему управления к нестационарным винтовым характеристикам. Также проблемой для изучения могут многие элементы КШМ, ГБЦ и т. д. В работах [19, 20] отмечается, что одним из наиболее уязвимых узлов современных малооборотных двигателей является выпускной клапан.

При работе на тяжелых остаточных топливах, содержащих ванадий (до 300–600 ppm) и натрий, на поверхности клапана образуются легкоплавкие эвтектики (например, смесь V_2O_5 и Na_2SO_4 с температурой плавления 530 °C). При превышении указанной температуры происходит межкристаллитная коррозия и прогар тарелки клапана. Это накладывает жесткие требования не только к жаропрочным материалам, но и к системе топливоподготовки и режимам охлаждения. Таким образом, восстановление отечественного производства МОД должно сопровождаться разработкой собственных методов диагностики и прогнозирования ресурса клапанного узла.

В работах [21, 22] отмечается, что для судовых механических систем, особенно эксплуатируемых в арктических условиях, необходимо внедрение многоуровневой системы обеспечения надежности, включающей управление ресурсом и управление рисками. Применительно к создаваемым отечественным малооборотным двигателям это означает, что параллельно с конструкторской документацией должна разрабатываться программа мониторинга технического состояния, прогнозирования остаточного ресурса [2] и планового технического обслуживания, интегрированная в единую систему на всех этапах жизненного цикла с учетом новых требований к энергоэффективности и снижению экологической нагрузки [24].

Заключение (Conclusion)

Проведенный анализ показывает, что российская судостроительная отрасль сохраняет производственный потенциал, подтвержденный проектами ССК «Звезда», Балтийского завода и модернизацией «Адмиралтейских верфей» совместно с «Северной верфью». Кроме того, критический износ флота (>70 % судов старше 30 лет) вместе с полной остановкой выпуска малооборотных двигателей на Брянском машиностроительном заводе создают системный разрыв: строить крупнотоннажные суда технически возможно, но оснащать их силовыми установками отечественного производства — такой возможности пока нет.

Основной вывод заключается в том, что проблема импортозамещения в сегменте главных двигателей мощностью выше 7–10 МВт находится не столько в плоскости станков и литейных

мощностей, сколько в возрождении инженерной школы, расчетной базы и технологической культуры двухтактного дизелестроения. Проект ОСК с опорой на Кингисеппский МСЗ и Пролетарский завод — это не только производственная задача, но и попытка заново создать отрасль, утраченную с 2015 г. Определенный управляющим директором КМЗ период для разработки и постановки на производство судовых малооборотных двигателей для крупнотоннажного флота выглядит оптимистичным: мировой опыт показывает, что вывод на рынок новой линейки малооборотных двигателей с учетом требований IMO Tier III (по NO_x, SO_x и углеродной нейтральности) занимает 5–7 лет даже при наличии лицензионной базы.

Еще одним вызовом является эксплуатация МОД в Арктике. Как показывают расчеты, для усиленных ледовых классов потребная мощность двигателя может достигать 45 МВт и выше, что выводит создаваемые МОД за пределы первоначально заявленного диапазона 5–15 МВт. Это означает, что параллельно с разработкой базовой линейки необходимо вести НИОКР по разработке двигателей следующего поколения (мощностью 20–60 МВт), возможно, с использованием альтернативных схем (БКШМ, двухтопливные циклы с газом, аммиаком или метанолом). Таким образом, достижение технологического суверенитета в крупнотоннажном судостроении возможно только при следующих условиях:

– успешное завершение проекта МОД в 2028–2030 гг. (с учетом неизбежных сдвигов);

– создание национальной технологической школы, включая новые модели расчета термодинамических и динамических нагрузок;

– интеграция систем мониторинга и диагностики на всех этапах жизненного цикла.

Если эти условия будут выполнены, то к 2035 г. Россия сможет не только компенсировать отсутствие поставок MAN и WinGD, но и занять нишу арктических и двухтопливных двигателей, где требования к надежности и экологии максимальны. В противном случае отрасль останется заложником единичных верфей с ручной сборкой импортных компонентов, что противоречит задачам «Стратегии развития судостроения до 2050 года».

Необходимо отметить, что технологический суверенитет в двигателестроении невозможен без современной методологии проектирования. Как отмечается в работе [6], использование цифровых двойников, ансамблей моделей машинного обучения и многокритериальной оптимизации позволяет сократить сроки разработки на 20–30 % и повысить точность прогнозов эксплуатационных показателей до уровня 3–5 %. Интеграция этих подходов в отечественную практику является необходимым условием для вывода конкурентоспособных малооборотных двигателей к 2030 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Живлюк Г. Е.* Основные направления и перспективы развития судовых двухтактных крейцкопфных малооборотных двигателей / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2026. — Т. 18. — № 1. — С. 112–127. EDN WHUZQX. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-112-127.

2. А. А. Добродеев, К. Е. Сазонов // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14. — № 3(55). — С. 427–436. EDN FFIOOH. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-427-436.

3. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 12.05.2025 г. № 1181-р [Электронный ресурс] / Правительство России. Режим доступа: http://government.ru/docs/all/158942/ (дата обращения: 13.04.2026).

4. *Саламатов В. Ю.* Интеграция северного морского путис международными транспортными коридорами / В. Ю. Саламатов, Е. А. Метелева, А. В. Проскурин // Российский внешнеэкономический вестник. — 2025. — № 7. — С. 7–27. EDN STSOUD. DOI: 10.24412/2072-8042-2025-7-7-27.

5. *Андреева Е. В.* Формализация показателя стесненности акватории Северного морского пути / Е. В. Андреева, А. Л. Тезиков // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 1. С. 55–62. EDN WZHJEX. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-55-62.

6. *Конев Г. А.* Прогнозирование эксплуатационных показателей энергетических установок судов класса Афрамакс на этапах их проектирования: специальность 2.5.20 «Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Георгий Алексеевич Конев. — Санкт-Петербург: Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 2026. — 218 с.

7. *Загородников М. А.* Проблема использования морских транспортных услуг при реализации политики импортозамещения в отечественном судостроении / М. А. Загородников, А. В. Титов // Экономика и управление. — 2018. № 5(151). — С. 28–34. EDN UVCPXS.

8. MEPC 2014-15 [Электронный ресурс] / International maritime organization. Режим доступа: https://www.imo.org/en/knowledgecentre/indexofimoresolutions/pages/mepc-2014-15.aspx (дата обращения: 19.03.2026).

9. *Ребров Б. В.* Судовые газотурбинные установки / Б. В. Ребров. — Л.: Изд-во «Судпромгиз», 1961. — 237 с.

10. Анализ изменения мощности привода судна на маршруте, характерном для северных морских широт России / А. А. Смирнов, А. В. Карпычев, А. Д. Кондаков, С. С. Рудакова // Неделя науки Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. — 2022. — № 3–2. EDN LKNAAE.

11. Анализ экономичности различных типов судовых энергетических установок, эксплуатируемых на маршрутах, характерных для северных морских широт России / А. А. Смирнов, А. В. Карпычев, А. Д. Кондаков, С. С. Рудакова // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. — 2023. — № 3(7). — С. 5–8. EDN TBLRFU.

12. *Dragsted J.* The first 50 years of turbocharged 2-stroke, crosshead, marine diesel engines / J. Dragsted Frankfurt: CIMAC, 2013. — 96 с.

13. *Ефросимов К. А.* Судовые дизель-газотурбинные установки типа CODAG и CODOG / К. А. Ефросимов // Развитие инфраструктуры внутреннего водного транспорта: традиции, инновации (РИВВТ-2024) : Сборник трудов межвузовской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 05 декабря 2024 года. Часть 1. — Санкт-Петербург: Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 2025. — С. 113–116. EDN GXIQDY.

14. *Коробков Ю. П.* Коробков, Ю. П. 40-летие судового дизелестроения на ОАО «Брянский машиностроительный завод» / Ю. П. Коробков, Л. В. Кайков // Судостроение. — 2002. — № 1(740). — С. 35–39. EDN HVPEON.

15. *Глазюк Д. К.* Анализ особенностей рабочего цикла судовых двутопливных малооборотных дизелей / Д. К. Глазюк // Научные труды Дальрыбвтуза. — 2024. — Т. 68. — № 2. — С. 132–139. EDN YYBOCB. DOI: 10.48612/dalrybvtuz/2024-68-15.

16. *Иващенко Н. А.* Сравнительная оценка габаритных и удельных мощностных показателей судовых малооборотных двигателей с различными приводными механизмами / Н. А. Иващенко, Ю. А. Пахомов, С. А. Киселев // Вестник Брянского государственного технического университета. — 2006. — № 4(12). — С. 29–36. EDN KWBKBZ.

17. *Тарануха Н. А.* Динамика упругих систем в машинных отделениях судов с главными малооборотными дизелями / Н. А. Тарануха, С. А. Худяков // Труды Центрального научно-исследовательского института имени академика А.Н. Крылова. — 2012. — № 67(351). — С. 161–168. EDN OWYKZT.

18. *Шаратов А. С.* Сопоставление результатов ходовых испытаний крупнотоннажных судов, оснащенных малооборотным главным двигателем / А. С. Шаратов // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. Серия: Морские технологии. — 2023. — № 1. — С. 53–60. EDN KHXQEF.

19. *Борисов Е. В.* К вопросу о неисправностях элементов судовых малооборотных двигателей с электронным управлением / Е. В. Борисов, В. В. Герасиди // Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф. Ф. Ушакова. — 2023. — № 1(42). — С. 31–35. EDN LDDUTW.

20. *Борисов Е. В.* Факторы, влияющие на разрушение выпускных клапанов судовых малооборотных двигателей, работающих на тяжелом топливе / Е. В. Борисов, В. В. Герасиди // Эксплуатация морского транспорта. — 2023. — № 2(107). — С. 117–123. EDN HTEFBB. DOI: 10.34046/aumsuomt107/20.

21. *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 имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 5. — С. 775–783. EDN FFKEEK. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-775-783.

22. *Мосейко Е. С.* Применение структурных методов для оценки надежности судовых механических систем / Е. С. Мосейко, Е. О. Ольховик, В. Г. Никифоров // Вестник государственного университета морского

и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 834–844. EDN NBOOCB. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-834-844.

23. *Кузнецов Р. В.* К вопросу упрочнения высоконагруженных деталей, работающих в узлах трения судовых дизелей / Р. В. Кузнецов, В. Г. Теплухин, Е. О. Ольховик // Глобальная энергия. — 2025. — Т. 31. — № 3. — С. 74–85. EDN SXPFHG. DOI: 10.18721/JEST.31305.

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

REFERENCES

1. Zhivljuk, G. E. and Petrov A. P. “Main directions and prospects for the development of marine twostroke cross-head low-speed engines.” *Vestnik Gosudarstvennogo Universiteta Morskogo I Rechnogo Flota Imeni Admirala S. O. Makarova* 18.1 (2026): 112–127. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-112-127.

2. Dobrodeev, A. A., K. E. Sazonov. “What should be the power capacity of a supership to operate in the eastern part of the arctic?” Arctic: Ecology and Economy 14.3(55) (2024): 427–436. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-427-436.

3. Pravitel’stvo Rossii. “Rasporyazhenie Pravitel’stva Rossiyskoy Federatsii ot 12.05.2025 g. № 1181-r.” Web. April 13, 2026 < http://government.ru/docs/all/158942/ >.

4. Salamatov, V. Yu., E. A. Meteleva and A. V. Proskurin. “Integration of the northern sea route with international transport corridors.” *Russian Foreign Economic Journal* 7 (2025): 7–27. DOI: 10.24412/2072-8042-2025-7-7-27.

5. Andreeva, E. V. and Tezikov A. L. “Formalization of the constraint indicator of the northern sea route water area.” *Vestnik Gosudarstvennogo Universiteta Morskogo I Rechnogo Flota Imeni Admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 55–62. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-55-62.

6. Konev, G. A. Prognozirovanie ekspluatacionnyh pokazatelej energeticheskih ustanovok sudov klassa Aframaks na etapah ih proektirovaniya. PhD diss. St. Petersburg: Gosudarstvennyj universitet morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova, 2026.

7. Zagorodnikov, M. A. and A. V. Titov. “The problem of using marine transportation services in the context of import substitution policy implementation in russian shipbuilding.” *Economics and Management* 5(151) (2018): 28–34.

8. International maritime organization. “MEPC 2014-15.” Web. March 19, 2026 < https://www.imo.org/en/knowledgecentre/indexofimoresolutions/pages/mepc-2014-15.aspx >.

9. Rebrov, B. V. *Sudovye gazoturbinnye ustanovki.* L.: Izd-vo Sudpromgiz, 1961: 237.

10. Smirnov, A. A., A. V. Karpychev, A. D. Kondakov and S. S. Rudakova. “Analysis of changes in ship drive power on the route, typical for the northern natural areas of russia.” *Nedelya nauki Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnicheskogo universiteta* 3-2 (2022).

11. Smirnov, A. A., A. V. Karpychev, A. D. Kondakov and S. S. Rudakova. “Analysis of the efficiency of various types of marine power plants used on routes characteristic of the northern natural areas of russia.” *Transactions of The St. Petersburg State Marine Technical University* 3(7) (2023): 5–8.

12. Dragsted, J. *The first 50 years of turbocharged 2-stroke, crosshead, marine diesel engines.* Frankfurt: CIMAC, 2013: 96.

13. Efrosimov, K. A. “Marine diesel-gas turbine installations of the codag and codog types.” *Razvitie infrastruktury vnutrennego vodnogo transporta: traditsii, innovatsii (RIVVT-2024) : Sbornik trudov mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, Sankt-Peterburg, 05 dekabrya 2024 goda. Chast’ 1* Sankt-Peterburg: Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova, 2025: 113–116.

14. Korobkov, Yu. P. and L. V. Kaykov. “40th anniversary of marine diesel engineering at pc “bryansky engineering plant”.” *Shipbuilding* 1(740) (2002): 35–39.

15. Glazyuk, D. K. “Analysis of the features of the working cycle of marine dual-fuel low-speed diesels.” *Scientific Journal of The Far East State Technical Fisheries University* 68.2 (2024): 132–139. DOI: 10.48612/dalrybvtuz/2024-68-15.

16. Ivaschenko, N. A., Yu. A. Pakhomov and S. A. Kiselev. “Sravnitel’naya otsenka gabaritnykh i udel’nykh moschnostnykh pokazateley sudovykh malooborotnykh dvigateley s razlichnymi privodnymi mekhanizmami.” *Bulletin of Bryansk State Technical University* 4(12) (2006): 29–36.

17. Taranukha, N. A. and S. A. Khudyakov. “Dinamika uprugikh sistem v mashinnykh otdeleniyakh sudov s glavnymi malooborotnymi dizelyami .” *Transactions of The Krylov Shipbuilding Research Institute* 67(351) (2012): 161–168.

18. Sharatov, A. S. “Comparison of results of sea trials of tankers equipped with man b&w low-speed main engine.” *Bulletin of Kerch State Marine Technological University. Series: Marine Technology* 1 (2023): 53–60.

19. Borisov, E. V. and V. V. Gerasidi. “On the issue of malfunctions of the elements of low-speed marine engines with electronic control.” *Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta imeni admirala F.F. Ushakova* 1(42) (2023): 31–35.

20. Borisov, E. V. and V. V. Gerasidi. “Factors affecting the destruction of exhaust valves of marine low-speed engines running on heavy fuel.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2(107) (2023): 117–123. DOI: 10.34046/aumsuomt107/20.

21. 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 imeni admirala S.O. Makarova* 16.5 (2024): 775–783. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-775-783.

22. Moseyko, E. S., E. O. Ol’khovik and V. G. Nikiforov. “Application of structural methods to assess the reliability of ship’s mechanical systems.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 15.5 (2023): 834–844. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-834-844.

23. Kuznetsov, R. V., V. G. Teplukhin and E. O. Ol’khovik. “On strengthening methods for highly loaded components operating in friction units of marine diesel engines.” *Global’naya energiya* 31.3 (2025): 74–85. DOI: 10.18721/JEST.31305.

24. Reutskiy, A. S. and E. O. Ol’khovik. “Using automatic identification system data to determine the carbon footprint of shipping.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.2 (2026): 171–189. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-171-189.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ефросимов Кирилл Ашурович —
аспирант ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *kefrosimov@gmail.com*

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

Кузнецов Руслан Валерьевич —
кандидат технических наук
ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, Российская Федерация, Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д.29 литера Б
email: *kuznetsov_rv@spbstu.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Reutskii Aleksandr. S. —
Postgraduate Student of the Department of Shipbuilding and Power Plants
Admiral Makarov State University of Maritimeand Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035, Russian Federation
e-mail: *reutskii.as@rs-class.org*

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

Kuznetsov, Ruslan Valer’evich —
PhD in Technical Sciences,
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University
29 B, Polytechnicheskaya, St.Petersburg,195251, Russian Federation
email: *kuznetsov_rv@spbstu.ru*

Статья поступила в редакцию: 27 апреля 2026 г.
Received: Apr. 27, 2026.

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

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-452-462 **EDN SLWWPH**

УДК: 621.352.6:534.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПРАВЛЕННЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА РАБОТУ ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

И. В. Розов

Сибирский государственный университет водного транспорта,
Новосибирск, Российская Федерация

В статье представлен комплексный анализ существующих активных и пассивных методов управления водным балансом в топливных элементах. Целью исследования является экспериментальная оценка влияния направленных газодинамических колебаний звукового диапазона на эффективность работы единичного топливного элемента, а также разработка рекомендаций по совершенствованию таких систем для судовых энергетических установок. Описана конфигурация разработанного лабораторного стенда с целью проведения испытаний в условиях протекания электрохимической реакции (in-situ) на опытном образце элемента активной площадью 25 см² с внешним газодинамическим генератором. Установлено, что газодинамическое воздействие на основной гармонике с частотой 1,68 кГц обеспечивает прирост плотности мощности исследуемого элемента более 25 % за счет интенсификации процессов массопереноса и эффективного удаления избыточной влаги. Экспериментально подтверждена перспективность интеграции систем газодинамического контроля в конструкцию судовых энергетических установок на базе топливных элементов. Отличительной особенностью данного исследования от аналогичных работ является реализация in-situ испытаний с использованием внешнего газодинамического генератора звукового диапазона. Впервые для отечественной научной литературы экспериментально обоснован резонансный механизм газодинамического воздействия на газовые реагенты и мембранно-электродный блок, а также доказана возможность значительного прироста выходной мощности топливного элемента предложенным методом. Актуальность проведенного исследования обусловлена необходимостью декарбонизации водного транспорта в соответствии с требованиями Международной морской организации, а также отсутствием в России систем активного газодинамического управления водным балансом для судовых энергетических установок на топливных элементах. Полученные результаты могут быть использованы для разработки адаптивных систем влагоудаления, работающих в реальных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: водородная энергетика, топливный элемент, мембранно-электродный блок, повышение эффективности, газодинамические колебания, акустические волны давления, управление водным балансом, интенсификация массопереноса, влагоотведение, водный транспорт, судовая энергетическая установка.

Для цитирования:
Розов И. В. Исследование влияния направленных газодинамических колебаний на работу топливного элемента судовой энергетической установки / И. В. Розов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 3. 452–462. EDN SLWWPH. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-452-462.

STUDY OF THE INFLUENCE OF DIRECTED GAS-DYNAMIC OSCILLATIONS ON THE OPERATION OF A FUEL CELL IN A SHIPBOARD POWER PLANT

I. V. Rozov

Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russian Federation

The paper presents a comprehensive analysis of existing active and passive methods for water management in fuel cells. The study aims to experimentally evaluate the effect of directed gas-dynamic oscillations in the audible

frequency range on the performance of a single fuel cell, as well as to develop recommendations for improving such systems for shipboard power plants. The configuration of the developed laboratory test bench for in situ testing under electrochemical reaction conditions is described using a prototype cell with an active area of 25 cm² and an external gas-dynamic generator. It was found that gas-dynamic excitation at the fundamental frequency of 1.68 kHz increases the power density of the studied cell by more than 25% due to the intensification of mass transfer processes and the efficient removal of excess moisture. The obtained results experimentally confirm the prospects for integrating gas-dynamic control systems into shipboard fuel cell power plants. A distinctive feature of this study compared with similar studies is the implementation of in situ tests using an external gas-dynamic generator operating in the audible frequency range. For the first time in the Russian scientific literature, the resonant mechanism of gas-dynamic action on gaseous reactants and the membrane electrode assembly is experimentally substantiated, and the possibility of a significant increase in fuel cell output power using the proposed method is demonstrated. The relevance of the study is determined by the need to decarbonize waterborne transport in accordance with the requirements of the International Maritime Organization, as well as by the absence of active gas-dynamic water management systems for shipboard fuel cell power plants in Russia. The results obtained can be used as a basis for developing adaptive moisture removal systems operating under actual operating conditions.

Keywords: hydrogen energy; fuel cell; membrane electrode assembly; efficiency enhancement; gas-dynamic oscillations; acoustic pressure waves; water management; mass transfer intensification; moisture removal; waterborne transport; shipboard power plant.; moisture removal; waterborne transport; shipboard power plant.

For citation:
Rozov, Ilya V. “Study of the influence of directed gas-dynamic oscillations on the operation of a fuel cell in a shipboard power plant” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.3 (2026): 452–462. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-452-462.

Введение (Introduction)

Морской транспорт обеспечивает более 80 % мирового товарооборота, что создает высокую техногенную нагрузку на окружающую среду. При этом флот остается одним из основных источников выбросов парниковых газов, что обусловлено использованием традиционных высокоуглеродных видов топлива: тяжелого мазута, маловязкого и дизельного топлива. В условиях ужесточения международных экологических нормативов, в частности требований Международной морской организации (IMO) по декарбонизации водного транспорта и достижению углеродной нейтральности к 2050 г., возникает острая необходимость перехода морского и речного транспорта на альтернативные низкоуглеродные источники энергии. В настоящее время водородные топливные элементы с протонообменной мембраной (ПОМТЭ) рассматриваются в качестве перспективных энергоустановок для водного транспорта.

Водородная энергетика в настоящее время является одним из перспективных направлений для достижения декарбонизации транспортного сектора, включая водный транспорт [1–4]. Среди технологий водородной энергетики отдельная роль отводится топливным элементам — электрохимическим устройствам прямого преобразования химической энергии топлива в электрическую энергию, где при использовании водорода единственным продуктом реакции является вода.

Среди различных типов топливных элементов широкое распространение на судах получили топливные элементы с ПОМТЭ. Это обусловлено их высокими удельными энергетическими характеристиками, быстрым запуском и низкими рабочими температурами [5]. Однако широкое внедрение ПОМТЭ сдерживается рядом эксплуатационных проблем, важнейшими из которых являются снижение стабильности работы и постепенное ухудшение выходных параметров, вызванные нарушениями баланса влагосодержания в структуре ячейки [6]. Критически важным является своевременное удаление избытка капельной влаги, образующейся в результате конденсации продукта реакции. Накопление жидкой воды приводит к блокировке («затоплению») пор газодиффузионных слоев (ГДС) и каналов поля потока, что препятствует подводу реагентов к активным центрам катализатора, вызывая резкое падение плотности мощности топливного элемента. Таким образом, поиск методов интенсификации процессов массопереноса и эффективного управления водным балансом в ПОМТЭ является актуальной научно-технической задачей [7, 8].

Целью данной работы является исследование влияния направленных газодинамических (акустических) колебаний на эффективность работы единичного топливного элемента (ЕТЭ) и составление рекомендаций по совершенствованию систем ПОМТЭ для их эффективного применения в судовых энергетических установках.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- разработать экспериментальный стенд для исследования влияния газодинамических колебаний на работу ПОМТЭ в условиях протекания электрохимической реакции (*in-situ*);
- определить резонансные частоты, при которых наблюдается максимальный прирост мощности ЕТЭ;
- оценить изменение поляризационных и мощностных характеристик при газодинамическом воздействии;
- сформулировать рекомендации по интеграции систем газодинамического контроля в конструкцию СЭУ.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Анализ известных методов управления водным балансом в ПОМТЭ. В ПОМТЭ полимерная мембрана является проводником ионов водорода (H^+). Ионная проводимость мембраны обеспечивается за счет переноса протонов через систему водных каналов, формирующихся внутри гидратированных сульфокислотных кластеров. Следовательно, степень гидратации полимерного электролита напрямую определяет его ионную проводимость [9].

Вода, образующаяся в ходе электрохимической реакции в ПОМТЭ, способствует поддержанию необходимого уровня увлажнения мембраны. Недостаточное увлажнение мембраны ведет к ее дегидратации, что влечет за собой снижение протонной проводимости. Вместе с тем избыточное содержание влаги может вызвать набухание мембраны и привести к ее затоплению, что нарушает транспорт кислорода к каталитическому слою [10]. Затопление блокирует пути газообмена, замедляя протекание электрохимической реакции, что приводит к значительному снижению эффективности работы ПОМТЭ, а в перспективе — к повреждению его компонентов, приводящему к нестабильности функционирования топливного элемента. ПОМТЭ особенно подвержен затоплению при высоких плотностях тока и / или низкой скорости потока реагентов [11]. Для решения изложенных проблем необходима разработка эффективных и надежных методов управления водным балансом, предотвращающих затопление и способных обеспечить высокие эксплуатационные характеристики ПОМТЭ.

Процесс затопления охватывает все функциональные узлы ПОМТЭ: каталитический слой, газодиффузионный слой и каналы поля потока. При этом эффективность функционирования катода напрямую зависит от способности системы своевременно отводить скопившуюся жидкость из каналов.

Механизм удаления капель воды с поверхности ГДС определяется сложным балансом сил: силами сопротивления, инерции и адгезии. Отрыв капель происходит тогда, когда суммарное воздействие сил сопротивления и инерции превышает силу адгезии к поверхности ГДС. Если адгезия определяется преимущественно смачиваемостью (гидрофобностью) материалов, то силы сопротивления и инерции зависят от скорости газового потока и геометрических размеров капель [7, 12].

Большинство классических исследований сосредоточено на методах пассивного управления водным балансом. Некоторые из этих методов основаны на оптимизации конструкции топливных элементов, включая геометрию каналов для подачи реагентов, структуру ГДС, а также системы удаления воды. Другие подходы сосредоточены на оптимизации рабочих параметров и условий эксплуатации топливного элемента [13].

В отличие от пассивных методов, активные методы управления водным балансом основаны на внешнем воздействии на потоки реагентов или структуру мембранно-электродного блока

(МЭБ) для принудительного удаления избытка влаги. К таким методам относятся продувка каналов избыточным давлением, использование систем электроосмотической откачки, внешнее механическое воздействие. Активные методы могут обеспечивать более эффективное удаление воды по сравнению с пассивными методами. Кроме того, они позволяют достичь более высоких эксплуатационных характеристик при сопоставимом энергопотреблении даже в реальных условиях работы ПОМТЭ. Объем исследований активных методов, использующих внешнее возбуждение, на данный момент ограничен. Это обусловлено тем, что методы пассивного контроля конструктивно проще и потребляют меньше энергии [7].

Одним из наиболее перспективных и интенсивно развивающихся направлений в рамках активного управления является применение направленных газодинамических (акустических) колебаний. Данный метод может быть реализован различными способами, например, путем наложения газодинамических колебаний на поток катодного реагента или посредством вибрационного воздействия на биполярную пластину. Газодинамическое воздействие позволяет не только интенсифицировать массоперенос в диффузионных слоях, но и обеспечить эффективный вынос капельной влаги за счет резонансных явлений и снижения адгезии воды к поверхностям ПОМТЭ [14].

Можно выделить следующие направления изучения влияния газодинамических колебаний на ПОМТЭ с целью оптимизации его работы [7, 15, 16]:

1. *Интенсификация массопереноса*. Газодинамические колебания способствуют «разрушению» пограничных слоев в каналах поля потока, обеспечивая лучший транспорт реагентов к активным центрам катализатора и эффективный отвод продукта реакции (воды). Турбулизация потока на микроуровне снижает концентрационные потери, особенно при работе на высоких плотностях тока.

2. *Управление водным балансом и предотвращение затопления.* Газодинамическое воздействие в звуковом диапазоне инициирует осцилляции менисков жидкости в капиллярной структуре МЭБ. Это снижает адгезию капель воды к поверхностям каналов и пор ГДС, способствуя их эффективному дроблению и своевременному выносу из анодных и катодных полостей. Таким образом, предотвращается блокировка транспортных каналов (затопление), что стабилизирует напряжение и продлевает ресурс компонентов топливного элемента.

3. *Снижение омического сопротивления и сопротивления переноса заряда.* Газодинамическое воздействие интенсифицирует проникновение газовых реагентов в пористую структуру каталитического слоя, что подтверждается данными электрохимической импедансной спектроскопии. Это приводит к снижению как омических потерь, так и потерь переноса заряда (сопротивления активации), а также к увеличению эффективной площади активной поверхности катализатора и, как следствие, повышению удельной мощности ПОМТЭ.

4. *Диагностика состояния системы в реальном времени.* Газодинамический отклик может быть использован как метод неразрушающего контроля. Анализ параметров колебаний дает возможность идентифицировать начало процесса дегидратации мембраны или, напротив, избыточного накопления влаги на ранних стадиях, что позволяет корректировать параметры подачи реагентов.

Теоретические аспекты эффективности применения различных виброакустических методов для удаления избыточной воды в ПОМТЭ были рассмотрены в источнике [17]. Исследователями предложены три основных подхода к принудительному влагоотведению: генерация изгибных волн в биполярной пластине, использование акустических волн давления (АВД) и применение локализованных поверхностных акустических волн (ПАВ). Были рассчитаны минимальные паразитные потери мощности, необходимые для удаления 628 капель воды радиусом 2 мм в минуту (10,5 каплям в секунду), которые составили для изгибных волн 230 мВт, для АВД — 21 мВт, и для ПАВ — 0,063 мВт. Теоретическое сравнение показало, что, несмотря на крайне малые энергозатраты для всех рассмотренных методов, наибольший потенциал с точки зрения эффективности и реализуемости демонстрирует подход с использованием ПАВ.

Эффективность активных методов подтверждена рядом экспериментальных работ. Так, в исследованиях [18] в условиях *ex-situ* было показано, что применение АВД позволяет значительно снизить площадь накопленной влаги на поверхности ГДС в определенных частотных диапазонах. Испытания [7], проведенные в условиях *in-situ*, подтвердили, что внешнее возбуждение газового потока посредством АВД повышает производительность ПОМТЭ за счет интенсификации отвода воды силами инерции, что особенно эффективно проявляется при низких скоростях подачи газа.

Кроме того, согласно [14], АВД способствуют стабилизации рабочих характеристик и частичному восстановлению производительности топливных элементов даже при существенной деградации поровой структуры ГДС. Это обусловлено способностью акустических колебаний эффективно очищать пути транспорта реагентов от застойных зон влаги.

Проведенный обзор актуальной научной литературы свидетельствует об отсутствии отечественных исследований в области виброакустического и газодинамического воздействия на работу ПОМТЭ (подавляющее большинство публикаций по данной тематике представлено зарубежными авторами). При этом в доступных работах наблюдается ограниченность данных, полученных в реальных условиях работы ячейки (*in-situ*), что затрудняет комплексную оценку влияния газодинамического воздействия на выходные параметры ПОМТЭ.

Описание опытного образца единичного топливного элемента. Экспериментальное исследование влияния газодинамических колебаний на производительность ПОМТЭ выполнялось на единичном топливном элементе собственной конструкции с площадью активной зоны 25 см^2. Конструкция ЕТЭ выполнена с учетом обеспечения высокой герметичности и жесткости топливной ячейки. Газодинамическая плотность модуля позволяет создавать внутри ячейки избыточное давление до 0,2 МПа. Усилие от сжатия стягивающими винтами распределялось равномерно по площади активной зоны.

Газодиффузионный слой ЕТЭ изготовлен из электропроводящих и коррозионностойких материалов с высокими газодиффузионными характеристиками (в данном случае из углеродного волокна). Для уплотнительных прокладок выбран силикон толщиной 1,05 мм, совместимый с материалами компонентов топливного элемента и предотвращающий утечку газов.

В качестве токосъемника использовался сетчатый коллектор из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, обеспечивающей коррозионную стойкость. Встроенная в газораспределительную пластину термопара обеспечивала возможность точного измерения рабочей температуры элемента. С целью визуального контроля образования конденсата корпусные детали, включая газораспределительные пластины, были изготовлены из прозрачного акрилового стекла.

МЭБ ЕТЭ включал протонообменную мембрану Nafion 212, газодиффузионные слои из углеродного волокна Sigracet 22 BB на аноде и катоде, а также каталитические слои с загрузкой платины 0,4 мг/см^2 на основе отечественного катализатора РМ-30, которые были нанесены на мембрану методом аэрографического напыления с последующим горячим прессованием.

Описание испытательного стенда. Натурные исследования по повышению эффективности ЕТЭ проводились в условиях протекания электрохимической реакции (*in-situ*) на созданном в лаборатории научно-исследовательской службы ФГБОУ ВО «СГУВТ» испытательном стенде (рис. 1 и 2), содержащем блоки и устройства для регулирования давления, расхода и увлажнения газовых реагентов (водорода и воздуха) [19].

В составе испытательного стенда ЕТЭ, динамик, генератор газодинамических колебаний, измерительные приборы и системы точного регулирования и контроля параметров газовых потоков (расход, давление, температура и относительная влажность).

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) и кривые мощности снимались с помощью программируемой электронной нагрузки АКИП-1380 в режиме стабилизации тока. Все измерения проводились после выхода элемента на стационарный режим работы, определяемый стабилизацией напряжения в пределах ±5 мВ.

Измерения температуры ЕТЭ, топлива и окислителя производились с помощью термопары типа К (никель – хром и никель – кремний) с диапазоном измерения температур от 0 до 100 °С.

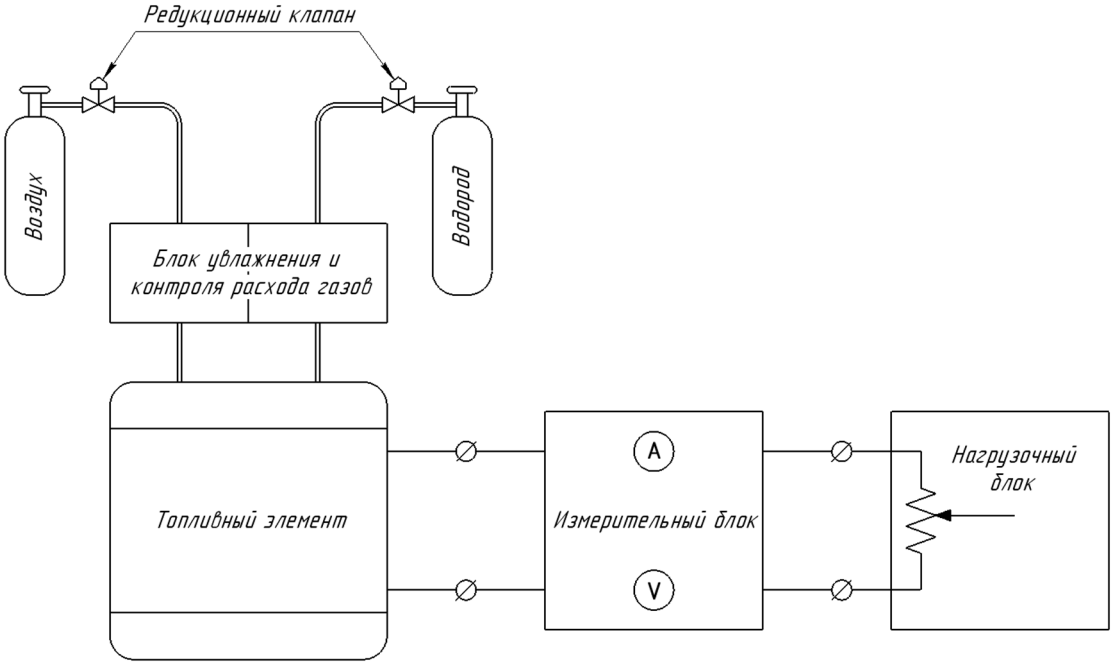


Рис. 1. Схема испытательного стенда для проведения исследований ПОМТЭ
Fig. 1. Schematic Diagram of the Test Bench for PEMFC Studies

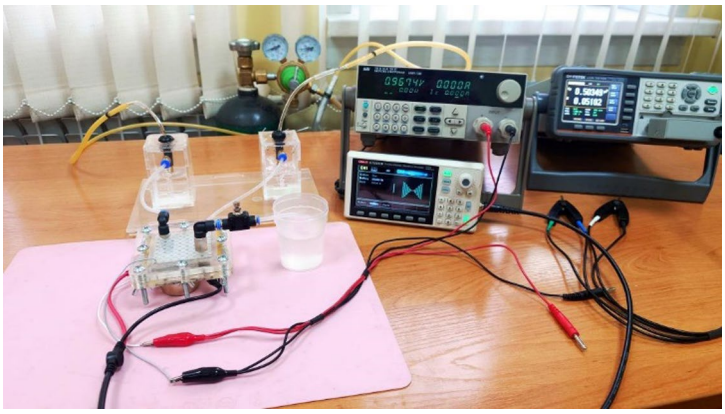


Рис. 2. Внешний вид испытательного стенда для проведения исследований ПОМТЭ
Fig. 2. General View of the Test Bench for PEMFC Studies

Методика проведения испытаний. Испытания ЕТЭ проводились в контролируемых условиях, обеспечивающих стабильную работу элемента, по типовой методике[1], представленной на рис. 3.

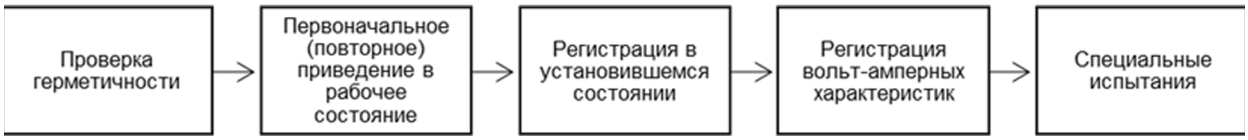


Рис. 3. Типовая последовательность операций при проведении испытаний единичного топливного элемента
Fig. 3. Typical Sequence of Operations for Testing a Single Fuel Cell

[1] ГОСТ IEC/TS 62282-7-1–2016. Технологии производства топливных батарей. Ч. 7–1: Топливные элементы с полимерным электролитом. Методы испытаний единичного элемента. М. : Стандартинформ, 2017. 46 с.

В качестве топлива использовался водород высокой чистоты (99,99 %), в качестве окислителя — кислород воздуха. Газовые реагенты подавались на электроды с давлением 135 кПа, предварительно увлажнялись до относительной влажности 100 % и нагревались до температуры 50 °С. Рабочая температура элемента в ходе испытаний поддерживалась в диапазоне от 45 до 55 °С.

Варьируемым параметром являлась частота генерируемых газодинамических колебаний. Основной задачей являлось определение резонансных частот, при которых наблюдалось максимальное улучшение электрохимических характеристик. Источник газодинамических колебаний (динамик) крепился к кислородной стороне ЕТЭ (рис. 4).

Рис. 4. ЕТЭ с прикрепленным к нему динамиком
Fig. 4. Single Fuel Cell with an Attached Speaker

Таким образом, разработанный экспериментальный стенд позволяет оценить влияние газодинамических колебаний на работу ПОМТЭ, а также определить резонансные режимы, способные обеспечить максимальный прирост мощности ячейки за счет интенсификации массопереноса и удаления избыточной влаги.

Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

В ходе экспериментального исследования было зафиксировано значительное повышение эффективности работы ЕТЭ при воздействии газодинамических колебаний определенного диапазона, который подбирался опытным путем.

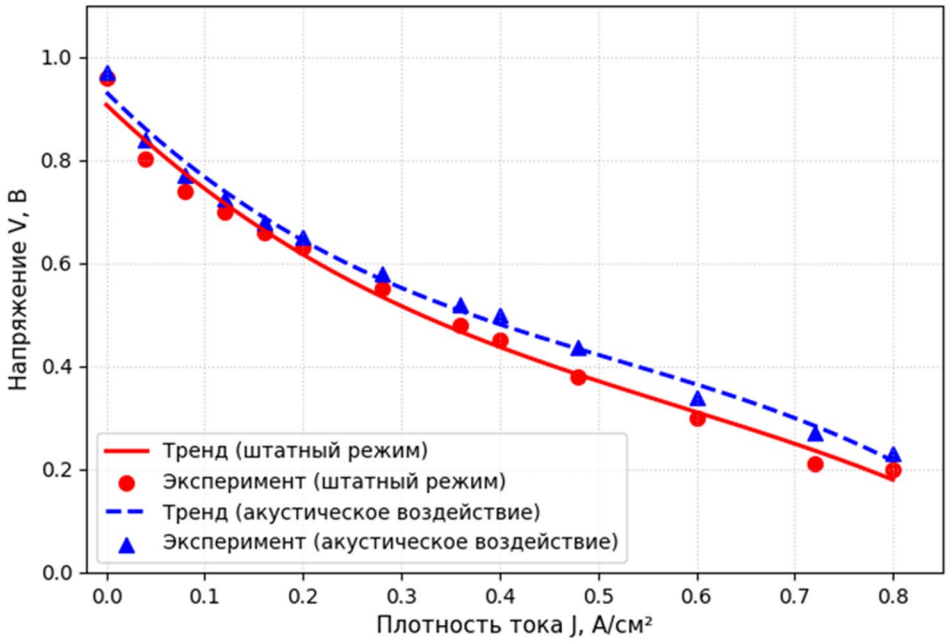
Наибольшая эффективность воздействия газодинамических колебаний достигается за счет конструкции корпуса топливного элемента (по большей части газовых каналов), обеспечивающей распространение газодинамических колебаний с пиком интенсивности в районе активной зоны реакции и создание резонансных явлений за счет сочетания плотности, упругости и формы элементов для достижения совпадения частоты источника газодинамических колебаний с собственной частотой резонанса элементов.

На основе результатов испытаний были установлены следующие рабочие характеристики МЭБ: напряжение разомкнутой цепи, ВАХ, плотность тока, максимальная плотность мощности. На рис. 5 показаны сравнительные характеристики работы ЕТЭ в штатном режиме и при воздействии газодинамических колебаний, создаваемых при помощи динамика.

При воздействии газодинамическими колебаниями на газовые реагенты и МЭБ единичного топливного элемента было достигнуто увеличение плотности мощности примерно в 1,25 раза по сравнению со штатным режимом работы.

Максимальная эффективность работы ЕТЭ наблюдалась при частоте газодинамических колебаний, равной 1,68 кГц (основная гармоника). Повышение эксплуатационных показателей элемента также было зарегистрировано в условиях резонансного возбуждения на кратных октавных частотах.

а)



б)

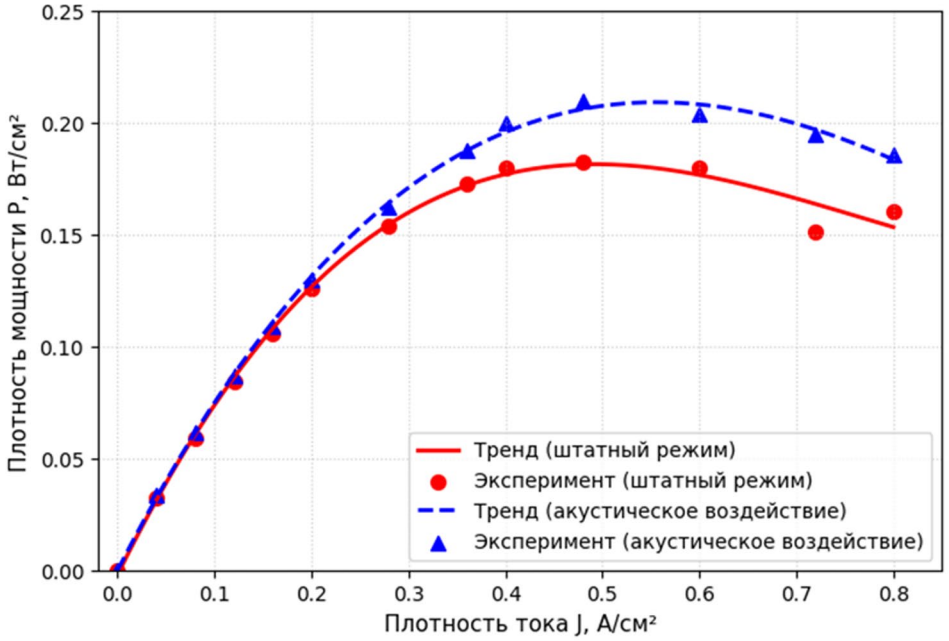


Рис. 5. Кривые поляризации (*а*) и кривые плотности мощности (*б*) мембранно-электродного блока единичного топливного элемента в штатном режиме и при воздействии направленных газодинамических колебаний
Fig. 5. Polarization Curves (*a*) and Power Density Curves (*b*) of the Membrane Electrode Assembly of a Single Fuel Cell under Normal Operating Conditions and under Directed Gas-Dynamic Oscillations

Полученные результаты свидетельствуют о наличии ярко выраженного резонансного эффекта, который способствует интенсификации процессов массопереноса и эффективному удалению влаги из активной зоны топливного элемента.

Заключение (Conclusion)

В работе выполнено экспериментальное исследование влияния направленного газодинамического воздействия на работу ПОМТЭ. На основании полученных результатов сформулированы следующие выводы:

1. Экспериментально установлено, что направленное газодинамическое воздействие является эффективным методом активного управления водным балансом в ПОМТЭ. Применение данного воздействия позволило достичь увеличения максимальной плотности мощности ЕТЭ более чем на 25 % по сравнению с режимом работы без воздействия.

2. Максимальный прирост производительности для данного ЕТЭ зафиксирован на резонансной частоте 1,68 кГц. Это свидетельствует о том, что эффективность метода зависит от геометрических и капиллярных характеристик ячейки.

3. Повышение эффективности обусловлено интенсификацией процессов массопереноса (разрушение пограничных слоев) и эффективным удалением капельной влаги из ГДС и газовых каналов, что приводит к снижению омических потерь и сопротивления переноса заряда.

4. Предлагаются следующие практические рекомендации для совершенствования систем ПОМТЭ в составе СЭУ:

- при проектировании СЭУ должны быть выполнены расчеты и проведены калибровочные испытания для настройки собственных резонансных частот конструкций системы и выбора оптимальных параметров газодинамического воздействия. Особое внимание следует уделить анализу фонового вибрационно-акустического спектра машинного отделения. Это позволит оценить возможности энергоэффективного пассивного использования существующих колебаний или, при их несовпадении, обосновать необходимость установки компактных активных излучателей с калибровкой на выявленный эффективный диапазон. Такой подход обеспечит максимальный эффект от газодинамического воздействия на работу ПОМТЭ с учетом реальных условий эксплуатации на судне;
- включение газодинамических устройств в конструкцию коллекторов подачи газа ПОМТЭ может быть использовано для оперативной адаптации работы энергоустановки к меняющимся условиям эксплуатации, например, при маневрировании судна;
- в качестве перспективного направления рекомендуется разработка адаптивных систем газодинамического контроля, включающихся при обнаружении признаков затопления ПОМТЭ. Это позволит повысить эффективность СЭУ, обеспечить ее стабильную работу и долговечность, минимизировав энергопотребление вспомогательных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zhaka V.* Hydrogen as fuel in the maritime sector: From production to propulsion / V. Zhaka, B. Samuelsson // Energy Reports. — 2024. — Vol. 12. — Pp. 5249–5267. DOI: 10.1016/j.egyr.2024.11.005.

2. *Jayabal R.* Hydrogen energy storage in maritime operations: A pathway to decarbonization and sustainability / R. Jayabal // International Journal of Hydrogen Energy. — 2025. — Vol. 109. — Pp. 1133–1144. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2025.02.207.

3. *Коняев Д. В.* Судовая Энергетическая установка для «водородных» танкеров с установкой повторного сжижения / Д. В. Коняев // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 93–108. EDN ZOBONJ. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-93-108.

4. *Розов И. В.* Обзор зарубежных стратегий по водородной энергетике и возможности их адаптации на водном транспорте в Российской Федерации / И. В. Розов, О. В. Спиренкова, С. В. Титов [и др.] // Транспортное дело России. — 2026. — № 1. — С. 155–162. — EDN BMAKJG.

5. Sustainable Maritime Decarbonization: A Review of Hydrogen and Ammonia as Future Clean Marine Energies / C. Jin, JH. Choi, C. Lee, MH. Kim // Sustainability. — 2025. — Vol. 17. — Is. 24. DOI: 10.3390/su172411364.

6. Energy efficiency improvements by investigating the water flooding management on proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) / O. S. Ijaodola, Z. El-Hassan, E. Ogungbemi, F. N. Khatib, T. Wilberforce, J. Thompson, A. G. Olabi // Energy. — 2019. — Vol. 179. — Pp. 246–267. DOI: 10.1016/j.energy.2019.04.074.

7. *Kim J. Y.* Improving polymer electrolyte membrane fuel cell performance and preventing flooding by exciting gas flow / J. Y. Kim, M. Mortazavi, S. Y. Jung // Journal of Power Sources. — 2024. — Vol. 617. — Pp. 235181. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2024.235181.

8. Partial flooding and its effect on the performance of a proton exchange membrane fuel cell / J. Shen, L. Xu, H. Chang, Z. Tu, S. H. Chan // Energy Conversion and Management. — 2020. — Vol. 207. — Pp. 112537. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112537.

9. *Park M. J.* Ion transport in sulfonated polymers / M. J. Park, S. Y. Kim // Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics. — 2013. — Vol. 51. — Is. 7. — Pp. 481–493. DOI: 10.1002/polb.23257.

10. Observation of flooding-induced performance enhancement in PEMFCs / H. Choi, J. Kim, O. Kwon, H. Yoo, H. Kim, H. Cha, T. Park // International Journal of Hydrogen Energy. — 2022. — Vol. 47. — Is. 9. — Pp. 6259–6268. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.11.234.

11. *Bazylak A.* Dynamic water transport and droplet emergence in PEMFC gas diffusion layers / A. Bazylak, D. Sinton, N. Djilali // Journal of Power Sources. — 2008. — Vol. 176. — Is. 1. — Pp. 240–246. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2007.10.066.

12. *Mortazavi M.* Role of Droplet Dynamics on Contact Line Depinning in Shearing Gas Flow / M. Mortazavi, S. Y. Jung // Langmuir. — 2023. — Vol. 39. — Is. 30. — Pp. 10301–10311. — DOI: 10.1021/acs.langmuir.3c00065.

13. *Ous T.* Visualisation of water accumulation in the flow channels of PEMFC under various operating conditions / T. Ous, C. Arcoumanis // Journal of Power Sources. — 2009. — Vol. 187. — Is. 1. — Pp. 182–189. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2008.10.072.

14. *Kim J. Y.* Performance recovery of irreversibly degraded gas diffusion layers in polymer electrolyte membrane fuel cell / J. Y. Kim, S. Y. Jung // Energy Conversion and Management. — 2025. — Vol. 342. — Pp. 120175. DOI: 10.1016/j.enconman.2025.120175.

15. Influence of cathode flow pulsation on performance of proton-exchange membrane fuel cell / Y. H. Kim, H. S. Han, S. Y. Kim, G. H. Rhee // Journal of Power Sources. — 2008. — Vol. 185. — Is. 1. — Pp. 112–117. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2008.06.069.

16. Recent advances in acoustic diagnostics for electrochemical power systems / J. O. Majasan, J. B. Robinson, R. E. Owen, M. Maier, A. N. P. Radhakrishnan, M. Pham, T. G. Tranter, Y. Zhang, P. R. Shearing, D. J. L. Brett // Journal of Physics: Energy. — 2021. — Vol. 3. — Is. 3. — Pp. 032011. DOI: 10.1088/2515-7655/abfb4a.

17. *Palan V.* Removal of excess product water in a PEM fuel cell stack by vibrational and acoustical methods / V. Palan, W. S. Shepard, K. A. Williams // Journal of Power Sources. — 2006. — Vol. 161. — Is. 2. — Pp. 1116–1125. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2006.06.021.

18. Enhanced Water Removal from PEM Fuel Cells Using Acoustic Pressure Waves / M. Mortazavi, A. D. Santamaria, J. Z. Benner, V. Chauhan // Journal of The Electrochemical Society. — 2019. — Vol. 166. — Is. 7. — Pp. F3143. DOI: 10.1149/2.0211907jes.

19. *Розов И. В.* Микроволокнистые газодиффузионные слои для топливных элементов судовых энергетических установок / И. В. Розов, С. А. Лопатин, Д. В. Баранов [и др.] // Речной транспорт (XXI век). — 2025. — № 1(113). — С. 34–37. EDN TOJNQQ.

REFERENCES

1. Zhaka, V. and B. Samuelsson. “Hydrogen as fuel in the maritime sector: From production to propulsion.” *Energy Reports* 12 (2024): 5249–5267. DOI: 10.1016/j.egyr.2024.11.005.

2. Jayabal, R. “Hydrogen energy storage in maritime operations: A pathway to decarbonization and sustainability.” *International Journal of Hydrogen Energy* 109 (2025): 1133–1144. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2025.02.207.

3. Konyaev, D. V. “Ship power plant with re-liquefaction installation for tankers transporting hydrogen.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.1 (2023): 93–108. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-93-108.

4. Rozov, I. V., O. V. Spirenkova, S. V. Titov et al. “Review of foreign hydrogen strategies and the possibilities of their adaptation in water transport in the russian federation .” *Transport Business in Russia* 1 (2026): 155–162.

5. Jin, C., JH. Choi, C. Lee and MH. Kim. “Sustainable Maritime Decarbonization: A Review of Hydrogen and Ammonia as Future Clean Marine Energies.” *Sustainability* 17.24 (2025). DOI: 10.3390/su172411364.

6. Ijaodola, O. S., A. G. Olabi et al. “Energy efficiency improvements by investigating the water flooding management on proton exchange membrane fuel cell (PEMFC).” *Energy* 179 (2019): 246–267. DOI: 10.1016/j.energy.2019.04.074.

7. Kim, J. Y., M. Mortazavi and S. Y. Jung. “Improving polymer electrolyte membrane fuel cell performance and preventing flooding by exciting gas flow.” *Journal of Power Sources* 617 (2024): 235181. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2024.235181.

8. Shen, J., S. H. Chan et al. “Partial flooding and its effect on the performance of a proton exchange membrane fuel cell.” *Energy Conversion and Management* 207 (2020): 112537. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112537.

9. Park, M. J. and S. Y. Kim. “Ion transport in sulfonated polymers.” *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics* 51.7 (2013): 481–493. DOI: 10.1002/polb.23257.

10. Choi, H., T. Park et al. “Observation of flooding-induced performance enhancement in PEMFCs.” *International Journal of Hydrogen Energy* 47.9 (2022): 6259–6268. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.11.234.

11. Bazylak, A., D. Sinton and N. Djilali. “Dynamic water transport and droplet emergence in PEMFC gas diffusion layers.” *Journal of Power Sources* 176.1 (2008): 240–246. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2007.10.066.

12. Mortazavi, M. and S. Y. Jung. “Role of Droplet Dynamics on Contact Line Depinning in Shearing Gas Flow.” *Langmuir* 39.30 (2023): 10301–10311. DOI: 10.1021/acs.langmuir.3c00065.

13. Ous, T. and C. Arcoumanis. “Visualisation of water accumulation in the flow channels of PEMFC under various operating conditions.” *Journal of Power Sources* 187.1 (2009): 182–189. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2008.10.072.

14. Kim, J. Y. and S. Y. Jung. “Performance recovery of irreversibly degraded gas diffusion layers in polymer electrolyte membrane fuel cell.” *Energy Conversion and Management* 342 (2025): 120175. DOI: 10.1016/j.enconman.2025.120175.

15. Kim, Y. H., H. S. Han, S. Y. Kim and G. H. Rhee. “Influence of cathode flow pulsation on performance of proton-exchange membrane fuel cell.” *Journal of Power Sources* 185.1 (2008): 112–117. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2008.06.069.

16. Majasan, J. O., D. J. L. Brett et al. “Recent advances in acoustic diagnostics for electrochemical power systems.” *Journal of Physics: Energy* 3.3 (2021): 032011. DOI: 10.1088/2515-7655/abfb4a.

17. Palan, V., W. S. Shepard and K. A. Williams. “Removal of excess product water in a PEM fuel cell stack by vibrational and acoustical methods.” *Journal of Power Sources* 161.2 (2006): 1116–1125. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2006.06.021.

18. Mortazavi, M., A. D. Santamaria, J. Z. Benner and V. Chauhan. “Enhanced Water Removal from PEM Fuel Cells Using Acoustic Pressure Waves.” *Journal of The Electrochemical Society* 166.7 (2019): F3143. DOI: 10.1149/2.0211907jes.

19. Rozov, I. V., S. A. Lopatin, D. V. Baranov et al. “Microfibre gas diffusion layers for fuel cells of ship’s power plants.” Rechnoy transport (XXI vek) 1(113) (2025): 34–37.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Розов Илья Владимирович —
аспирант, инженер научно-исследовательской службы,
ФГБОУ ВО «СГУВТ»
630099, Российская Федерация, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: *ilya_rozov@mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rozov, Ilya V. —
Postgraduate Student, Engineer of the Scientific Research Department,
Siberian State University of Water Transport,
33, Schetinkina str., Novosibirsk, 630099,
Russian Federation
e-mail: *ilya_rozov@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 06 марта 2026г.
Received: March 6, 2026.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-463-472 **EDN TKRNBB**

УДК 62-134

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОЧИХ КОЛЕС ВСТРЕЧНОГО ВРАЩЕНИЯ ОСЕВОЙ АКТИВНОЙ ТУРБИННОЙ СТУПЕНИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ОТНОШЕНИЯХ ОКРУЖНЫХ СКОРОСТЕЙ

В. Л. Конюков

Керченский государственный морской технологический университет,
г. Керчь, Российская Федерация

В работе выполнен анализ основных эксплуатационных характеристик соосных рабочих колес активной осевой турбинной ступени при встречном их вращении для различных отношений окружных скоростей. Исследования проводились с целью обеспечения согласованной работы рабочих колес встречного вращения и одновременно приводимых двух вспомогательных механизмов, что позволит снизить общее количество приводных двигателей. Получены оптимальные значения выходных углов рабочих решеток, соответствующих максимальному КПД турбинной ступени. Установлено, что увеличение окружной скорости второго рабочего колеса по отношению к окружной скорости первого приводит к снижению оптимальных выходных углов рабочих решеток, наиболее интенсивное снижение имеет место для второй рабочей решетки. В процессе исследований соотношение окружных скоростей рабочих колес при встречном вращении изменялось путем изменения окружной скорости второго рабочего колеса. При этом внешние характеристики первого рабочего колеса в зависимости от скоростной характеристики оставались неизменными, и характеристики турбинной ступени изменялись за счет показателей второго рабочего колеса. Определено влияние отношения окружных скоростей на оптимальную скоростную характеристику турбинной ступени и второго рабочего колеса. Полученные мощностные и моментные эксплуатационные показатели могут служить основанием для подбора вспомогательных механизмов приводимых рабочими колесами встречного вращения при проектировании морских судов и их энергетических установок.

Ключевые слова: турбинная ступень, рабочее колесо, встречное вращение колес, привод вспомогательных механизмов, скоростная характеристика, отношение окружных скоростей, мощность, коэффициент полезного действия, крутящий момент, углы потока.

Для цитирования:
Конюков В. Л. Анализ характеристик рабочих колес встречного вращения осевой активной турбинной ступени при различных отношениях окружных скоростей / В. Л. Конюков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 3. С. 463–472. EDN TKRNBB. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-463-472.

ANALYSIS OF THE CHARACTERISTICS OF COUNTER-ROTATING IMPELLERS OF AN ACTIVE-TYPE AXIAL TURBINE STAGE AT DIFFERENT CIRCUMFERENTIAL VELOCITY RATIOS

V. L. Konyukov

Kerch State Maritime Technological University

The paper analyzes the main operating characteristics of coaxial impellers of an active-type axial turbine stage operating in counter-rotation at different circumferential velocity ratios. The study was carried out to ensure the coordinated operation of counter-rotating impellers and the two auxiliary mechanisms driven by them, which makes it possible to reduce the total number of drive units. Optimal values of the outlet angles of the blade rows corresponding to the maximum efficiency of the turbine stage were obtained. It was found that an increase in the circumferential velocity of the second impeller relative to that of the first impeller leads to a decrease in the optimal outlet angles of the blade rows, with the most pronounced decrease observed for the second blade row. In the course of the study, the circumferential velocity ratio of the counter-rotating impellers was varied by changing the circumferential velocity of the second impeller. In this case, the external characteristics of the first

impeller as functions of the speed characteristic remained unchanged, while the characteristics of the turbine stage varied due to the parameters of the second impeller. The effect of the circumferential velocity ratio on the optimal speed characteristic of the turbine stage and the second impeller was determined. The obtained power and torque performance indicators can serve as a basis for selecting auxiliary mechanisms driven by counter-rotating impellers in the design of ships and their power plants.

Keywords: turbine stage; impeller; counter-rotating impellers; auxiliary mechanism drive; speed characteristic; circumferential velocity ratio; power; efficiency; torque; flow angles.

For citation:
Konyukov, Viacheslav L. "Analysis of the characteristics of counter-rotating impellers of an active-type axial turbine stage at different circumferential velocity ratios." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.3 (2026): 463–472. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-463-472.

Введение (Introduction)

Снижение массогабаритных показателей судового оборудования является одной из первостепенных проблем при проектировании и модернизации морских и промысловых судов [1, 2]. Перспективным направлением решения этой задачи может служить использование одного двигателя для привода нескольких механизмов вспомогательного или общесудового назначения. Сокращение количества приводов вспомогательных и общесудовых механизмов позволит уменьшить их массу, габариты, снизить капитальные и эксплуатационные затраты. Использование одновальных двигателей для привода нескольких потребителей устанавливает постоянное соотношение оборотов вспомогательных механизмов. При этом не всегда обеспечивается согласование характеристик двигателя и приводных механизмов. Наиболее перспективными в этом отношении являются двухвальные двигатели без механической связи валов. Вопросы применения турбомашин с рабочими колесами встречного вращения в энергетическом машиностроении рассматривались достаточно давно, начиная с 1950 г. [3–5] и касались вентиляторов, насосов, гидротурбин, т. е. машин, работающих практически с несжимаемыми рабочими средами и чаще в режиме потребления механической энергии [6].

В качестве такого двигателя предлагается использовать паровую или газовую турбину с соосными валами встречного вращения для одновременного привода двух вспомогательных механизмов с различными внешними характеристиками. Такая турбинная ступень включает сопловой аппарат и два последовательно соосно расположенных рабочих аппарата. Отвод мощности первого рабочего колеса в сторону соплового аппарата и второго, соответственно, в противоположную сторону позволяет обеспечить одинаковое направление вращения вспомогательных механизмов (правое или левое). Для организации противоположного направления вращения отвод мощности выполняется в одну сторону, когда вал одного рабочего колеса проходит внутри вала другого рабочего колеса [7–9].0

Проведенные исследования такой турбинной ступени активного типа для одинаковых окружных скоростей рабочих колес при встречном вращении показали, что ее можно использовать для одновременного привода двух механизмов с различными эксплуатационными параметрами [10]. Соотношение мощностей этих колес зависит от скоростной характеристики, определяемой как отношение окружной скорости на среднем диаметре рабочего колеса к абсолютной скорости рабочего тела на выходе из соплового аппарата [11, 12]. Снижение окружной скорости приводит к уменьшению относительной мощности первого рабочего колеса и, соответственно, к увеличению относительной мощности второго рабочего колеса [13]. Влияние конструктивных особенностей рабочих колес на показатели эффективности турбины рассмотрены в работах [14–16].

Анализ моментных характеристик показал, что второе рабочее колесо обладает большей склонностью к саморегулированию, т. е. к поддержанию частоты вращения при изменении нагрузки на ротор. Исследования характеристик паровых и газовых турбин со встречным вращением рабочих колес с учетом сжимаемости рабочего тела в научной литературе отсутствуют.

Наличие в турбинной ступени двух потоков отвода механической энергии, которые имеют только термодинамическую связь, усложняет исследование их внешних характеристик. В связи с этим задачи по определению проектных и эксплуатационных показателей турбин со встречным вращением рабочих колес, работающих на привод двух судовых механизмов, являются в настоящее время актуальными.

Судовые вспомогательные механизмы, как правило, отличаются характеристиками, которые включают потребляемую мощность, частоту вращения, крутящий момент и др. Отсутствие механической связи между рабочими колесами позволяет расширить типоразмерный ряд вспомогательных механизмов для привода одной турбинной ступенью.

Целью работы является анализ характеристик рабочих колес турбинной ступени при встречном их вращении для различных соотношений окружных скоростей, используемых для одновременного привода двух различных вспомогательных механизмов.

Методы и материалы (Materials and methods)

В качестве объекта исследований принята осевая турбинная ступень активного типа с двумя соосными рабочими колесами встречного вращения. Схема проточной части ступени представлена на рис. 1. Отсутствие механической связи между рабочими колесами и исключение направляющего аппарата перед вторым рабочим колесом является основным конструктивным отличием объекта исследований от ступени Кертиса [10].

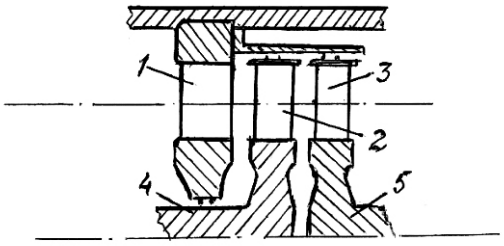


Рис. 1. Схема проточной части турбинной ступени с рабочими колесами встречного вращения:
1 — сопловой аппарат; *2* — первый рабочий аппарат; *3* — второй рабочий аппарат; *4* — вал отбора мощности первого рабочего колеса; *5* — вал отбора мощности второго рабочего колеса
Fig. 1. Flow Path Diagram of a Turbine Stage with Counter-Rotating Impellers:
1 — nozzle assembly; *2* — first rotor assembly; *3* — second rotor assembly; *4* — power take-off shaft of the first impeller; *5* — power take-off shaft of the second impeller

Поток рабочего тела, выходящий из первого рабочего колеса, поступает на второе рабочее колесо без изменения направления течения, что вызывает встречное вращение второго рабочего колеса. Треугольники скоростей такой турбинной ступени приведены на рис. 2.

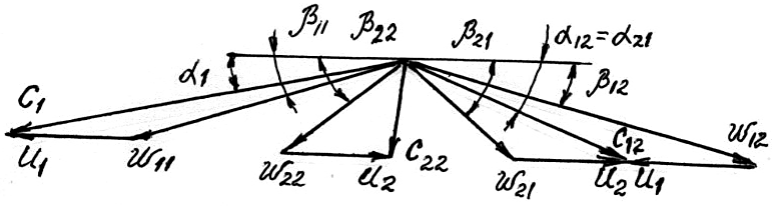


Рис. 2. Треугольники скоростей турбинной ступени встречного вращения
Fig. 2. Velocity Triangles of a Counter-Rotating Turbine Stage

Располагаемая работа ступени L_0 представляет сумму располагаемых работ соответственно соплового аппарата L_{01}, первого рабочего колеса L_{021} и второго рабочего колеса L_{022}:

$$L_0 = L_{01} + L_{021} + L_{022}. \quad (1)$$

На практике для активных турбинных ступеней применяется небольшая степень реактивности, исключающей замедленное течение в межлопаточных каналах рабочих колес по причине трения, что положительно отражается на их экономичности для режимов, отличных от номинального [11].

С целью упрощения исследований примем чисто активный вариант, когда степень реактивности рабочих колес равна нулю $\rho_1 = \rho_2 = 0$. В этом случае вся располагаемая работа будет срабатываться в сопловом аппарате $L_0 = L_{01}$. Учитывая, что располагаемая работа соплового аппарата в изоэнтропийном процессе в полном объеме расходуется на изменение внешней кинетической энергии, можно записать

$$L_0 = \frac{c_{1t}^2}{2} = \frac{c_1^2}{2\varphi^2}, \quad (2)$$

где c_{1t}, c_1 — соответственно, теоретическая и действительная скорость истечения из соплового аппарата (рис. 2); φ — коэффициент скорости соплового аппарата.

Исследование эксплуатационных параметров рабочих колес проводились в зависимости от скоростной характеристики первого рабочего колеса $v_1 = u_1 / c_1$ для различных отношений окружных скоростей рабочих колес $B = u_2 / u_1$. Таким образом, скоростная характеристика второго рабочего колеса определяется соотношением

$$\nu_2 = \frac{u_2}{c_1} = B\nu_1. \quad (3)$$

Окружную работу рабочих колес с различными окружными скоростями можно представить в виде соотношений [11]:

$$L_{u1} = u_1\left(w_{11u} + w_{12u}\right) = u_1\left(w_{11}\cos\beta_{11} + w_{12}\cos\beta_{12}\right); \quad (4)$$

$$L_{u2} = u_2\left(w_{21u} + w_{22u}\right) = u_2\left(w_{21}\cos\beta_{21} + w_{22}\cos\beta_{22}\right). \quad (5)$$

Окружные КПД рабочих колес после преобразований с учетом особенностей их работы определяются уравнениями:

$$\eta_{u1} = \frac{L_{u1}}{L_0} = 2\varphi^2\nu_1\left(\cos\alpha_1 - \nu_1\right)\left(1 + \psi_1\frac{\cos\beta_{12}}{\cos\beta_{11}}\right); \quad (6)$$

$$\eta_{u2} = \frac{L_{u2}}{L_0} = 2\varphi^2 B\nu_1\left[\psi_1\cos\beta_{12}\sqrt{1+\nu_1^2 - 2\nu_1\cos\alpha_1} - \nu_1\left(1+B\right)\right]\left(1 + \psi_2\frac{\cos\beta_{22}}{\cos\beta_{21}}\right), \quad (7)$$

где ψ_1, ψ_2 — коэффициенты скорости, соответственно, первого и второго рабочего колеса.

Мощности на окружности рабочих колес можно представить соотношениями

$$N_{u1} = GL_0\eta_{u1}; \quad (8)$$

$$N_{u2} = GL_0\eta_{u2}, \quad (9)$$

где G — массовый расход рабочего тела.

Из уравнений (8) и (9) следует, что мощности рабочих колес пропорциональны их окружным КПД.

Суммарный окружной КПД турбинной ступени с соосными рабочими колесами встречного вращения можно представить уравнением

$$\eta_u = \eta_{u1} + \eta_{u2}. \quad (10)$$

Для определения оптимального значения скоростной характеристики v_{1opt}, соответствующей максимальному значению окружного КПД ступени, выполнено исследование уравнения (10) на экстремум $\partial\eta_u / \partial v_1 = 0$.

После дифференцирования и преобразований получим

$$\nu_{1opt} = \frac{\cos\alpha_1}{2}\frac{1}{1+A}, \tag{13}$$

где $A = \dfrac{B\left(1+B+\psi_2\dfrac{\cos\beta_{22}}{\cos\beta_{21}}\right)+\psi_2\dfrac{\cos\beta_{22}}{\cos\beta_{21}}}{1+\psi_1\dfrac{\cos\beta_{12}}{\cos\beta_{11}}+B\left(\psi_1\dfrac{\cos\beta_{12}}{\cos\beta_{11}}+\psi_1\psi_2\dfrac{\cos\beta_{12}}{\cos\beta_{11}}\dfrac{\cos\beta_{22}}{\cos\beta_{21}}\right)}$.

Из полученного выражения следует, что оптимальное значение скоростной характеристики и, соответственно, максимальный окружной КПД ступени зависят от углов выхода из рабочих решеток β_{12} и β_{22}, которые в процессе эксплуатации конкретной турбинной ступени не изменяются, а также от отношения окружных скоростей B.

Для определения оптимальных выходных углов рабочих решеток были выполнены вариантные проработки зависимостей окружного КПД ступени от скоростной характеристики v_1 для различных значений B. При этом значения оптимальных выходных углов принимались для режима, соответствующего максимальному суммарному КПД турбинной ступени. Следует отметить, что срывные потери энергии в рабочих решетках, вызванные углами атаки при натекании на лопатки, не учитывались [17]. Углы выхода вычислялись по уравнениям:

$$\beta_{12} = \arcsin\left(\frac{\sin\alpha_1}{\psi_1\sqrt{1+\nu_1^2-2\nu_1\cos\alpha_1}}\right); \tag{14}$$

$$\beta_{22} = \arcsin\left[\frac{\psi_1}{\psi_2}\frac{\dfrac{w_{11}}{c_1}\sin\beta_{12}}{\sqrt{\psi_1^2\left(\dfrac{w_{11}}{c_1}\right)^2+\nu_1^2(1+B)^2-2\psi_1\dfrac{w_{11}}{c_1}\nu_1(1+B)\cos\beta_{12}}}\right], \tag{15}$$

где $\dfrac{w_{11}}{c_1} = \sqrt{1+\nu_1^2-2\nu_1\cos\alpha_1}$.

Крутящие моменты рабочих колес определялись по уравнениям:

$$M_1 = \mathrm{G}r c_1(\cos\alpha_1-\nu_1)\left(1+\psi_1\frac{\cos\beta_{12}}{\cos\beta_{11}}\right); \tag{16}$$

$$M_2 = \mathrm{G}r c_1\left[\psi_1\cos\beta_{12}\sqrt{1+\nu_1^2-2\nu_1\cos\alpha_1}-\nu_1(1+B)\right]\left(1+\psi_2\frac{\cos\beta_{22}}{\cos\beta_{21}}\right). \tag{17}$$

Сравнительный анализ зависимостей крутящих моментов рабочих колес от скоростной характеристики проводился в относительных величинах:

$$\bar{M}_1 = \frac{M_1}{M_{10}+M_{20}}; \qquad \bar{M}_2 = \frac{M_2}{M_{10}+M_{20}}. \tag{18}$$

Здесь M_{10} и M_{20} — крутящие моменты для окружных скоростей $u_1 = u_2$ ($B = 1$) и соответствующие максимальному суммарному окружному КПД ступени.

Результаты (Results)

Исследования характеристик турбинной ступени с двумя соосными рабочими колесами встречного вращения проводились расчетно-теоретическим методом. Решетки турбинных профилей соплового аппарата и рабочих колес сформированы цилиндрическими, радиально установленными лопатками с постоянным диаметром средней линии проточной части. Угол выхода из соплового аппарата принят α_1 = 12 град., коэффициент скорости соплового аппарата φ = 0,97, коэффициенты скоростей рабочих решеток $\psi_1 = \psi_2 = 0{,}95$. Отношение окружных скоростей рабочих колес ($B = u_1 / u_2$) изменялось от 0,25 до 2,0. Характеристики и эксплуатационные параметры ступени и рабочих колес встречного вращения обрабатывались в зависимости от скоростной характеристики первого рабочего колеса $v_1 = u_1 / u_2$, которая изменялась от 0 до 1,0.

Зависимости оптимальных выходных углов рабочих решеток, соответствующих оптимальной скоростной характеристике, от B приведены на рис. 3. Увеличение B от 0,25 до 2,0 привело к снижению оптимального выходного угла первого рабочего колеса на 4,5 град. и второго рабочего колеса соответственно на 23,5 град. В дальнейшем исследования характеристик ступени и рабочих колес в зависимости от скоростной характеристики v_1 проводились при неизменных выходных углах из рабочих решеток, соответствующих оптимальным значениям, полученным для конкретного отношения окружных скоростей.

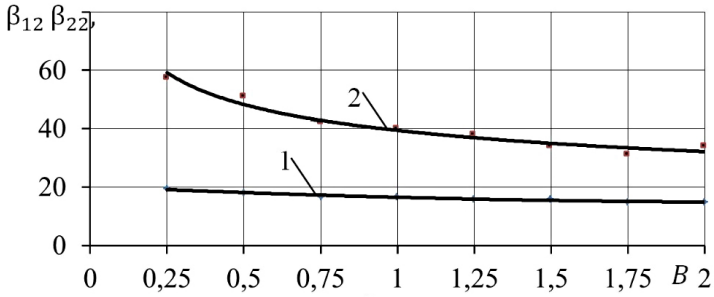


Рис. 3. Зависимости оптимальных выходных углов рабочих решеток профилей от B
1 — для первого рабочего колеса (β_{12}); *2* — для второго рабочего колеса (β_{22})
Fig. 3. Optimal Outlet Angles of the Blade Rows as Functions of B: *1* — for the first impeller (β12);
2 — for the second impeller (β22)

Зависимости суммарного окружного КПД ступени от скоростной характеристики первого рабочего колеса для различных отношений окружных скоростей рабочих колес при встречном их вращении приведены на рис. 4. Увеличение окружной скорости второго рабочего колеса по отношению к первому приводит к существенному уменьшению оптимальной скоростной характеристики, соответствующей максимальному окружному КПД турбинной ступени. При этом имеет место тенденция к снижению максимального КПД ступени, что можно объяснить повышением потерь энергии с выходной скоростью.

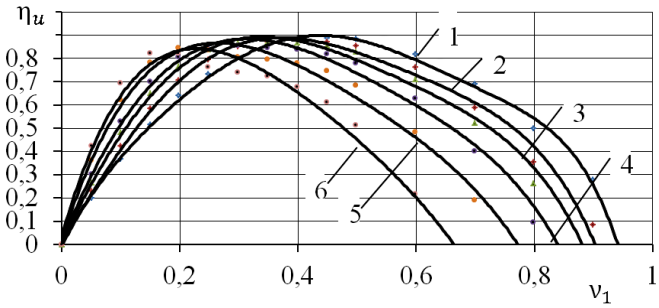


Рис. 4. Зависимости суммарного окружного КПД ступени от v_1
для различных отношений окружных скоростей:
1 — B = 0,25; *2* — B = 0,5; *3* — B = 0,75; *4* — B = 1,0; *5* — B = 1,5; *6* — B = 2,0
Fig. 4. Total Circumferential Efficiency of the Stage as a Function of v1 for Different Circumferential Velocity Ratios: *1* — B = 0,25; *2* — B = 0,5; *3* — B = 0,75; *4* — B = 1,0; *5* — B = 1,5; *6* — B = 2,0

Изменение характеристик объекта исследований вызвано изменением эксплуатационных параметров второго рабочего колеса. Принятая методика исследований и обработки результатов исследований, когда изменялась окружная скорость только второго рабочего колеса, сохранили неизменными характеристики первого рабочего колеса.

На рис. 5 показаны зависимости окружных КПД рабочих колес. Первая цифра позиций характеристик на рисунке означает номер рабочего колеса ступени. Согласно уравнениям (8) и (9) окружные КПД пропорциональны их мощностям. Снижение скоростной характеристики при уменьшении окружной скорости u_1 вызывает снижение мощности первого рабочего колеса и увеличение мощности второго рабочего колеса.

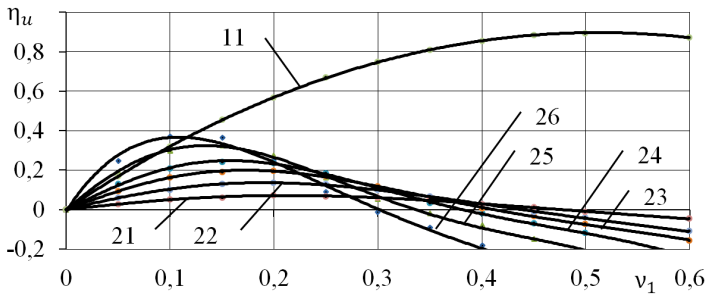


Рис. 5. Зависимости окружного КПД рабочих колес встречного вращения от v_1:
11 — для первого рабочего колеса; для второго рабочего колеса при различных отношениях окружных скоростей: *21* — *B* = 0,25; *22* — *B* = 0,5; *23* — *B* = 0,75; *24* — *B* = 1,0; *25* – *B* = 1,5; *26* — *B* = 2,0
Fig. 5. Circumferential Efficiencies of the Counter-Rotating Impellers as Functions of ν1: 11 — for the first impeller; for the second impeller at different circumferential velocity ratios: *21* — *B* = 0,25; *22* — *B* = 0,5; *23* — *B* = 0,75; *24* — *B* = 1,0; *25* – *B* = 1,5; *26* — *B* = 2,0

На рис. 6 показаны зависимости оптимальных эксплуатационных параметров ступени и рабочих колес от отношения окружных скоростей. В качестве оптимальных параметров приняты значения, соответствующие максимальному суммарному КПД ступени. Изменение *B* от 0,25 до 2,0 вызывает снижение суммарного окружного КПД ступени $\eta_{u\,opt}$ на 4,5 %. При этом окружной КПД первого рабочего колеса снизился на 32,6 %, а окружной КПД второго рабочего колеса повысился на 26,2 %.

Учитывая, что мощность рабочих колес пропорциональна окружным КПД, увеличение *B* в указанном диапазоне вызвало снижение мощности ступени на 5,1 %, уменьшение мощности первого рабочего колеса на 36,8 % и увеличение мощности второго рабочего колеса на 29,5 %. Следует отметить, что увеличение относительной окружной скорости второго рабочего колеса смещает оптимальную скоростную характеристику в область меньших значений.

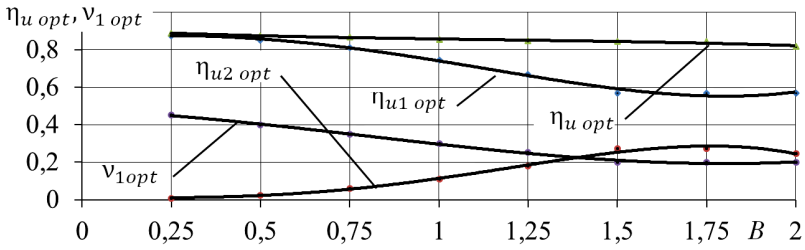


Рис. 6. Зависимости оптимальных эксплуатационных параметров от отношения окружных скоростей
Fig. 6. Optimal Operating Parameters as Functions of the Circumferential Velocity Ratio

Относительные моментные характеристики в зависимости от скоростной характеристики представлены на рис. 7. Изменение окружной скорости второго рабочего колеса по отношению к окружной скорости первого колеса при встречном вращении не изменяет моментной

характеристики первого колеса. У второго рабочего колеса с увеличением отношения окружных скоростей моментная характеристика становится круче, что свидетельствует об увеличении склонности к саморегулированию. При этом на 20 % увеличился момент страгивания.

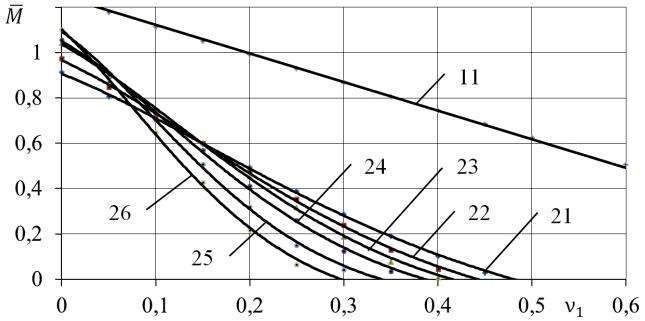


Рис. 7. Зависимости относительного момента рабочих колес встречного вращения:
11 — для первого рабочего колеса; для второго рабочего колеса при различных отношениях окружных скоростей: *21* — B = 0,25; *22* — B = 0,5; *23* — B = 0,75; *24* — B = 1,0; *25* — B = 1,5; *26* — B = 2,0
Fig. 7. Relative Torque of the Counter-Rotating Impellers: *11* — for the first impeller; for the second impeller at different circumferential velocity ratios: *21* — B = 0,25; *22* — B = 0,5; *23* — B = 0,75; *24* — B = 1,0; *25* — B = 1,5; *26* — B = 2,0

Анализ рис. 5 и 7 показал, что увеличение отношения окружных скоростей снижает диапазон скоростной характеристики, соответствующей положительной мощности второго рабочего колеса.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В работе выполнен анализ основных эксплуатационных характеристик соосных рабочих колес активной осевой турбинной ступени при встречном их вращении для различных отношений окружных скоростей. Получены оптимальные значения выходных углов рабочих решеток. Установлено, что увеличение окружной скорости второго рабочего колеса по отношению к окружной скорости первого приводит к снижению оптимальных выходных углов рабочих решеток, наиболее интенсивное снижение имеет место для второй рабочей решетки.

2. Увеличение отношения окружных скоростей рабочих колес вызывает снижение максимальных значений окружных КПД, что связано с повышением потерь энергии с выходной скоростью. При этом оптимальные значения скоростной характеристики смещаются в область меньших значений.

3. Уменьшение скоростной характеристики турбинной ступени приводит к увеличению относительной мощности второго рабочего колеса и снижению относительной мощности первого рабочего, при этом с увеличением отношения окружных скоростей интенсивность повышения относительной мощности второго рабочего колеса повышается.

4. С увеличением окружной скорости второго рабочего колеса по отношению к окружной скорости первого моментная характеристика второго рабочего колеса становится круче, что свидетельствует об увеличении его склонности к саморегулированию.

5. Полученные результаты позволяют реализовать подбор двух вспомогательных механизмов для одновременного привода турбинной ступенью с учетом согласования характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Егоров Э. О.* Идеология и практика обновления рыбопромыслового флота / Э. О. Егоров // Судостроение. — 2012. — № 1(800). — С. 18–20. EDN OYSDXH.

2. *Ватолин Д. С.* Перспективы развития отечественных пропульсивных комплексов для танкеров-газовозов класса ARC7 / Д. С. Ватолин // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 1. — С. 148–155. EDN IVBWNM. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-148-155.

3. Патент 2305772 Российская Федерация МПК F01D 1/26 осевая проточная турбина / В. В. Михайлов; № 2005127434/06; заявл. 01.09.2005; опубл. 10.09.2007. — Бюл. — № 25. — 7 с. EDN WFVEUK.

4. Заявка на патент 2002132845 Российская Федерация, МПК3/067 Осевая и осерадиальная турбомашина с колесами встречного вращения / А. Ф. Исачкин. — № 2002132845/06А; заявл. 03.12.2002; опубл. 20.08.2004.

5. Патент 2742711 Российская Федерация МПК F01D 1/32 Радиальная биротативная активно-реактивная турбина (варианты) / А. Г. Леонов, М. В. Палкин, С. В. Иванина; № 2018116219; заявл. 28.04.2018; опубл. 09.02.2021. — Бюл. № 4. — 22 с.

6. *Подболотов С. В.* Математическое и экспериментальное моделирование режимов работы центробежной турбомашиныс коаксиальным расположением рабочих колес / С. В. Подболотов, А. Д. Кольга // Известия Уральского государственного горного университета. — 2018. — № 1(49). — С. 80–84. EDN YVJMFW. DOI: 10.21440/2307-2091-2018-1-80-84.

7. *Конюков В. Л.* Особенности характеристик рабочего колеса турбомашины с радиальными лопатками симметричного профиля в режиме турбины / В. Л. Конюков, А. Н. Горбенко, В. И. Плющаев [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. — 2024. — № 4-2(66). — С. 64–69. EDN AVJYTZ. DOI: 10.37220/MIT.202A.66A.060.

8. *Ставинский А. А.* Совершенствование судовых электромеханических систем встречного вращения на основе специальных асинхронных двигателей / А. А. Ставинский // Судостроение. — 2011. — № 6(799). — С. 35–38. EDN ONPSNB.

9. *Левенталь М. Ю.* Оценка погрешности численного метода газодинамки при расчете профильных потерь в турбинных решетках / М. Ю. Левенталь // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. — 2014. — № 2. — С. 8–11. EDN ZIXESV.

10. *Конюков В. Л.* Характеристики судовой активной турбинной ступени, приводящей вспомогательные механизмы рабочими колесами встречного вращения / В. Л. Конюков // Научные проблемы водного транспорта. — 2025. — № 85. — С. 65–74. EDN OLDCZU. DOI: 10.37890/jwt.vi85.662.

11. *Кузнецов В. В.* Судовые турбомашины. Основы теории судовых турбомашинй. — Москва : ИНФРА-М. 2021. — 176 с.

12. *Погодин Ю. М.* Проблемы создания паровых турбин для компактных атомных энергетических установок кораблей с электродвижением / Ю. М. Погодин, А. П. Безухов // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. — 2023. — № 4(8). — С. 82–88. EDN UCWCEE.

13. *Пассар А. В.* Влияние конструктивного угла выхода сопел турбины системы наддува поршневого двигателя на эффективность ее работы / А. В. Пассар, Д. В. Тимошенко // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 4. — С. 553–566. EDN GXROPO. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-4-553-566.

14. *Крюков А. А.* Влияния шага сопловой лопатки на коэффициент скорости центростремительной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса / А. А. Крюков // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 73–81. EDN UEUORN. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-73-81.

15. *Крюков А. А.* Моделирование потерь энергии в центростремительной турбине с частичным облопачиванием рабочего колеса / А. А. Крюков, С. В. Куличков, А. А. Ратников // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 858–866. EDN RHUXEV. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-858-866.

16. *Фершалов Ю. Я.* Определение степени расширения сопел с малым углом выхода для сопловых аппаратов малорасходных турбин / Ю. Я. Фершалов, В. Т. Луценко // Судостроение. — 2012. — № 4(803). — С. 50–51. EDN PBMJCF.

17. *Конюков В. Л.* Характеристики рабочего колеса турбомашины с радиальными лопатками симметричного профиля в режиме компрессора / В. Л. Конюков, А. Н. Горбенко // Научные проблемы водного транспорта. — 2025. — № 83. — С. 86–94. EDN ERTYRE. DOI: 10.37890/jwt.vi83.593.

REFERENCES

1. Egorov, E. O. "Ideology and practical experience of fishing fleet renewal." *Shipbuilding* 1(800) (2012): 18–20.

2. Vatolin, D. S. "Development prospects for domestic propulsion systems of arc7 lng carriers." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 17.1 (2025): 148–155. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-148-155.

3. Mikhaylov, V. V. RU 2 305 772 C2, F 01 D 1/26. Osevaya protochnaya turbina. Russian Federation, assignee. Publ. September 10, 2007.

4. Isachkin, A. F. RU 2002132845A, IPC F02C3/067 Osevaya i oseradial`naya turbomashina s kolesami vstrechnogo vrashheniya. Russian Federation, assignee. Publ. 20 August 2004.

5. Leonov, A. G., M. V. Palkin, S. V. Ivanina. RU 2 742 711 C2, F 01 D 1/32. Radial'naya birotativnaya aktivno-reaktivnaya turbina (varianty). Russian Federation, assignee. Publ. February 9, 2021.

6. Podbolotov, S. V. and A. D. Kol'ga. "Mathematical and experimental modeling of centrifugal turbomachines' operating modes with a coaxial arrangement of impellers." *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* 1(49) (2018): 80–84. DOI: 10.21440/2307-2091-2018-1-80-84.

7. Konyukov, V. L., A. N. Gorbenko, V. I. Plyuschaev et al. "Characteristics of the turbomachine impeller with radial blades of symmetrical profile in turbine mode." Marine Intellectual Technologies 4-2(66) (2024): 64–69. DOI: 10.37220/MIT.202A.66A.060.

8. Stavinskiy, A. A. "Improvement of marine electromechanical counterrotating systems on the basis of special asynchronous motors." *Shipbuilding* 6(799) (2011): 35–38.

9. Levental', M. Yu. "Otsenka pogreshnosti chislennogo metoda gazodinamki pri raschete profil'nykh poter' v turbinnykh reshetkakh ." *Transactions of The St. Petersburg State Marine Technical University* 2 (2014): 8–11.

10. Konyukov, V. L. "Characteristics of the ship's active turbine stage that drives auxiliary mechanisms with counter-rotating impellers." *Russian Journal of Water Transport* 85 (2025): 65–74. DOI: 10.37890/jwt.vi85.662.

11. Kuznecov V.V., Pol'skij E.V. Marine turbomachines. Fundamentals of the theory of marine turbomachines. – *Moskva: INFRA-M*. 2021.-176 s.

12. Pogodin, Yu. M. and A. P. Bezukhov. "Problems of creating steam turbines for compact nuclear power plants of ships with electric propulsion." *Transactions of The St. Petersburg State Marine Technical University* 4(8) (2023): 82–88.

13. Passar, A. V. and D. V. Timoshenko. "The effect of the design angle of the turbine nozzle outlet of the piston engine boost system on its effectiveness." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 16.4 (2024): 553–566. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-4-553-566.

14. Kryukov, A. A. "The effect of the nozzle blade pitch on the velocity coefficient of the inflow turbine with partial blading of the runner." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 15.1 (2023): 73–81. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-73-81.

15. Kryukov, A. A., S. V. Kulichkov and A. A. Ratnikov. "Simulation of energy losses in an inflow turbine with partial blading of the runner." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 15.5 (2023): 858–866. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-858-866.

16. Fershalov, Yu. Ya. and V. T. Lutsenko. "Determination of the degree of expansion of nozzles with small outlet angle for nozzle blocks of low steam consumption turbines."*Shipbuilding* 4(803) (2012): 50–51.

17. Konyukov, V. L. and A. N. Gorbenko. "Characteristics of a turbomachine impeller with radial blades of symmetrical profile in compressor mode." *Russian Journal of Water Transport* 83 (2025): 86–94. DOI: 10.37890/jwt.vi83.593.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Конюков Вячеслав Леонтьевич —
кандидат технических наук, доцент
Керченский государственный морской технологический университет
298309, Российская Федерация, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82
e-mail: *seykgmtu@mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Viacheslav L. Konyukov —
PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Kerch State Maritime Technological University
82, Ordzhonikidze Str., Republic of Crimea, Kerch, 298309, Russian Federation
e-mail: *seykgmtu@mail.ru*

Статья поступила в редакцию: 03 марта 2026 г.
Received: Mar. 03, 2026.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-473-486 **EDN VAWIYV**

УДК: 621.431.74

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВТУЛКИ ЦИЛИНДРОВ СУДОВОГО МАЛОРАЗМЕРНОГО ДИЗЕЛЯ

Н. К. Санаев[1], В. В. Егоров[1], В. А. Жуков[2]

[1] ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», филиал в г. Каспийске, Российская Федерация
[2] ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Темой работы является анализ причин основных нарушений работы цилиндропоршневой группы судовых дизелей, в большинстве случаев возникающих вследствие воздействия на детали высоких температур и давлений. Целью проведенного исследования является расчетная оценка влияния внутрицилиндровых показателей рабочего процесса на теплонапряженное состояние втулок цилиндров маломерного судового дизеля 4Ч8,5/11 на номинальном режиме работы. Исследование проводилось с использованием метода конечных элементов, реализованного в программном комплексе Ansys, при помощи которого были решены задачи тепломеханического анализа состояния цилиндровой втулки. При проведении вычислений в качестве граничных температурных условий были приняты экспериментальные данные, для задания граничных условий давления на втулку цилиндров была использована индикаторная диаграмма, полученная для данного судового дизеля. Тепломеханический анализ проводился при постепенном увеличении расчетных нагрузок. Исследование включало два этапа: на первом этапе определялось температурное поле в цилиндровой втулке с учетом действующих тепловых нагрузок и свойств материала, рассчитывался тепловой поток через стенки втулки; на втором этапе рассчитанные температурные параметры были использованы для определения деформаций втулки с учетом действующих на нее давлений. Полученные результаты показали, что максимальная общая деформация под действием тепловых и механических нагрузок наблюдается в верхней части цилиндровой втулки. Определены запасы прочности при фактических нагрузках, соответствующих режиму номинальной мощности. Результаты исследований могут быть использованы для конструктивной модернизации деталей цилиндропоршневой группы дизеля 4Ч8,5/11, а также определения возможностей его дальнейшего форсирования.

Ключевые слова: судовой малоразмерный дизель, втулка цилиндра, индикаторная диаграмма, температурное поле, давление газов, метод конечных элементов, теплонапряженное состояние, деформация, предел прочности, надежность.

Для цитирования:
Санаев Н. К. Исследование теплонапряженного состояния втулки цилиндров судового малоразмерного дизеля / Н. К. Санаев, В. В. Егоров, В. А. Жуков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 3. С. 473–486. EDN VAWIYV. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-473-486.

INVESTIGATION OF THE THERMAL-STRESS STATE OF THE CYLINDER LINER OF A SMALL-SIZE MARINE DIESEL ENGINE

N. K. Sanaev[1], V. V. Egorov[1], V. A. Zhukov[2]

[1] Dagestan State Technical University, Branch in Kaspiysk, Kaspiysk, Russian Federation
[2] Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

The paper analyzes the causes of the main failures of the cylinder-piston group of marine diesel engines, which in most cases occur due to the effect of high temperatures and pressures on engine components. The purpose of the study is to provide a computational assessment of the influence of in-cylinder operating parameters on the thermal-stress state of the cylinder liner of a small-size marine diesel engine 4Ch8.5/11 under rated operating conditions. The study was carried out using the finite element method implemented in the Ansys software package, which was applied

to solve the problems of thermomechanical analysis of the cylinder liner. During the calculations, experimental data were used as boundary temperature conditions, while the indicator diagram obtained for this marine diesel engine was used to define the boundary pressure conditions acting on the cylinder liner. The thermomechanical analysis was performed with a gradual increase in the calculated loads. The study included two stages: at the first stage, the temperature field in the cylinder liner was determined taking into account the applied thermal loads and material properties, and the heat flow through the liner walls was calculated; at the second stage, the calculated temperature parameters were used to determine the liner deformations taking into account the pressures acting on it. The results showed that the maximum total deformation caused by thermal and mechanical loads is observed in the upper part of the cylinder liner. Safety factors were determined under actual loads corresponding to the rated power mode. The research results can be used for the design modernization of the components of the cylinder-piston group of the 4Ch8.5/11 diesel engine, as well as for determining the possibilities of its further power uprating.

Keywords: small-size marine diesel engine, cylinder liner, indicator diagram, temperature field, gas pressure, finite element method, thermal-stress state, deformation, ultimate strength, reliability.

For citation:
Sanaev, Nadir K., V. V. Egorov and V. A. Zhukov. "Investigation of the Thermal-Stress State of the Cylinder Liner of a Small-Size Marine Diesel Engine." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.3 (2026): 473–486. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-473-486.

Введение (Introduction)

Важным аспектом улучшения эксплуатационных свойств судовых дизелей (СД) являются показатели надежности, прежде всего характеризующие безотказность и долговечность. Эти показатели, в свою очередь, зависят от прочностных свойств материалов деталей и износостойкости их рабочих поверхностей. Детали ДВС подвергаются воздействиям переменных тепловых и механических нагрузок различного рода, в том числе со стороны химически агрессивных газов, образующихся в результате сгорания топлива. Нагрузки, действующие на детали цилиндропоршневой группы (ЦПГ), непосредственно зависят от мощностного режима работы ДВС и частоты вращения коленчатого вала. Наибольший научный и практический интерес представляет влияние параметров рабочих процессов на теплонапряженное состояние деталей ЦПГ. Одной из важнейших деталей ЦПГ является втулка цилиндра (ВЦ), формирующая камеру сгорания. Внутренняя поверхность ВЦ (зеркало) воспринимает давление и температуру газов в процессе осуществления рабочего цикла. Наружная поверхность ВЦ формирует рубашку охлаждения и омывается охлаждающей жидкостью.

В блоке цилиндров имеются опорные и направляющие бурты. Условия работы ВЦ определяются конструктивными параметрами остова ДВС и режимными параметрами системы охлаждения. В подавляющем большинстве СД находят применение сменяемые вставные охлаждаемые (мокрые) ВЦ. Конструкция ВЦ, способ монтажа втулок в блоке цилиндров и режимы охлаждения должны обеспечивать необходимую интенсивность отвода теплоты. Значительное влияние на процесс теплоотвода от деталей ЦПГ и их надежность оказывает степень износа [1]. Способность ВЦ выдерживать высокие нагрузки в процессе работы СД является необходимым условием безаварийной эксплуатации двигателя до истечения установленных сроков его службы.

Основные нарушения работы ЦПГ, приводящие к выходу двигателя из строя, вызываются износом зеркала и кавитационно-коррозионными разрушениями наружной поверхности, омываемой охлаждающей жидкостью [2]. Цилиндровые втулки работают в условиях высоких температур и давлений в сочетании с механическими воздействиями в результате перемещения поршня. Эти факторы необходимо учитывать при оценке надежности деталей ЦПГ. Изучение таких параметров, как температура, давление, температурные градиенты и распределение тепловых потоков, вызывающих внутренние напряжения в деталях ЦПГ, является критически важным для определения сроков службы и оценки долговечности СД.

В работах [3, 4] подробно описаны методы и результаты изучения теплопередачи в деталях ЦПГ и их теплового состояния. Доля оценки температурного состояния использовались различного рода датчики температуры и пленочные термометры. В экспериментах исследованиях [5] для оценки

интенсивности изнашивания втулок применялся индикаторный нутромер. В статье [6] описаны результаты, полученные с использованием термопар, установленных в ВЦ для изучения температуры в цилиндрах ДВС при различных оборотах коленчатого вала. В источнике [7] экспериментально установлено, что повышение температуры и давления в цилиндре СД вызывает искривление оси втулки и погрешности формы зеркала, что соответственно влияет на работу двигателя. В публикациях [8, 9] предлагается для оптимизации процесса теплоотвода от деталей ЦПГ применить теплоносители, включая наножидкости с высокотеплопроводными наночастицами мультиграфена, с различным составом и теплофизическими свойствами. В публикации [10] описаны результаты исследований теплообмена в кольцевом канале рубашки охлаждения гильзы цилиндра, подтверждающие возможность повышения эффективности работы судового дизеля за счет оптимизации процессов теплоотвода. Указанные ранее публикации [8–10] подтверждают актуальность исследований, направленных на совершенствование процессов охлаждения деталей ЦПГ с целью повышения надежности и эффективности работы судовых ДВС.

Результативным методом исследования процессов теплообмена является численное моделирование с использованием современных программных продуктов [11–13]. В публикации [14] описано численное моделирование процессов теплообмена в полостях охлаждения, позволяющее оценить теплонапряженное состояние деталей ЦПГ в процессе эксплуатации дизеля. В статье [15] представлены результаты моделирования состояния цилиндровой втулки, изготовленной из чугуна с нанесением кварца, эпоксидной смолы, полиэтилена при воздействии высоких температур. Авторами работы выполнено сравнение термических напряжений и тепловых потоков при нанесении различных материалов. В [16] рассмотрено численное моделирование теплового состояния одноцилиндрового двигателя с воздушным охлаждением при изготовлении ВЦ из разных материалов и проанализировано влияние выбора материала на термические нагрузки при работе двигателя.

Проведенный анализ источников литературы на данную тему подтверждает наличие различных факторов, влияющих на надежность деталей ЦПГ. Наиболее значимыми среди них являются температуры и давления, действующие на детали в процессе эксплуатации, что обусловливает актуальность продолжения исследований в данном направлении с целью численного моделирования теплонапряженного состояния ВЦ при номинальном режиме работы СД при частоте вращения коленчатого вала $n = 1500$ мин$^{-1}$ и оценки уровня надежности ВЦ.

Для оценки влияния на состояние ВЦ основных воздействующих параметров: температуры T и давления p, исследование проводилось в два этапа. На первом этапе определялись напряжения, возникающие под действием температуры, на втором этапе на полученные температурные напряжения накладывалось давление газов и определялись напряжения, действующие в цилиндровой втулке с учетом совокупности указанных факторов.

С целью более наглядного представления действующих на ВЦ нагрузок предлагается использовать квазистационарное воздействие температуры и давления. Таким образом будут определены фактические напряжения, испытываемые ВЦ при работе двигателя на установившемся режиме. Для осуществления указанных этапов необходимо решить следующие задачи:

– разработать 3D модель изучаемой втулки цилиндров с соблюдением заданных размеров;

– обеспечить качественное сеточное разбиение модели для проведения расчетов с использованием метода конечных элементов (МКЭ);

– установить температуры, действующие на поверхности исследуемой ВЦ;

– определить распределение температурного поля внутри ВЦ и рассчитать тепловые потоки на поверхностях ВЦ;

– задать действующие на поверхности ВЦ давлениями изученные при этом температурные нагрузки;

– рассчитать деформацию ВЦ при совместном воздействии температур и давлений, оценить ее теплонапряженное состояние;

– определить запас прочности при испытываемых нагрузках;

– выявить критические зоны в конструкции ВЦ;

– провести валидацию расчетов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Изучение влияния температурных и механических воздействий на теплонапряженное состояние деталей ДВС является сложным и трудоемким процессом. Аналитически можно решить некоторое количество относительно простых модельных задач, поэтому в инженерной практике для оценки надежности конструкции используют численные методы [17].

Численное моделирование способствует достижению точного представления о процессах, происходящих в двигателе, и позволяет разработать предложения по модернизации деталей ДВС. В процессе исследований расчеты проводились МКЭ, реализованном в программном комплексе Ansys.

Объектом исследования являлся судовой малоразмерный дизеля (СМД) марки 4Ч 8,5/11. Актуальность исследований обусловлена востребованностью отечественных двигателей для маломерных судов речного и морского флота России, а также необходимостью улучшения его технико-экономических характеристик и эксплуатационных показателей.

Исходя из разнообразия модификаций, СМД 4Ч 8,5/11 (4Ч 9,5/11) могут быть адаптированы к различным условиям работы. Эти двигатели успешно эксплуатируются в качестве вспомогательных дизелей для привода генераторов, компрессоров и насосов в составе различных аварийных, стояночных, резервных и комбинированных судовых агрегатов, а также являются главными двигателями рабочих и спасательных шлюпок, рыбопромысловых ботов и служебных катеров [7]. Безотказность и приспособляемость к различным ситуациям при эксплуатации делают их образцовыми для работы на морском и речном флоте. Основные характеристики данного модельного ряда представлены в табл. 1 в соответствии с Руководством по эксплуатации[1].

Таблица 1

Основные технические данные СМД 4Ч 8,5/11

Table 1

Main Technical Data of the SMD 4Ch 8.5/11 Diesel Engine

Тип двигателя	Дизельный, тронковый, безнаддувный
Число тактов	4
Порядок работы цилиндров	1 – 3 – 4 – 2
Расположение цилиндров	Вертикальное в ряд
Число цилиндров	4
Диаметр цилиндра, мм	85
Ход поршня, мм	110
Среднее эффективное давление, МПа	0,575
Средняя скорость поршня, м/с	5,5
Направление вращения коленчатого вала	Правое
Степень сжатия (расчетная)	17
Давление сжатия, МПа	3,3–4,1
Максимальное давление сгорания, МПа	6,7–7,3
Топливо	Дизельное
Система охлаждения	Жидкостная
Температура выходящей из дизеля жидкости, не более, °С	98
Коэффициент избытка воздуха	1,43 для дизелей без наддува

[1] Руководство по эксплуатации. Дизели ч 8,5/11 и ч 9,5/11. — М.: Внешторгиздат, 1988. — 160 с.

Таблица 1
(*Окончание*)

Номинальная мощность кВт Максимальная мощность кВт	19,1 20,9
Частота вращения вала при номинальной мощности, мин$^{-1}$	1500
Минимальная частота вращения коленчатого вала на режиме холостого хода, мин$^{-1}$	800
Удельный расход топлива по внешней скоростной характеристике, не более, кг/(кВт·ч)	0,272
Камера сгорания	Сферическая, расположена в поршне

Предметом исследования являлась ВЦ СМД 4Ч8,5/11 (рис. 1). Данные втулки запрессовываются в блок-картер. Наружная поверхность ВЦ омывается охлаждающей жидкостью. Уплотнение полости охлаждения втулок достигается вверху буртиком, притертым к блоку, внизу — уплотнительными резиновыми кольцами.

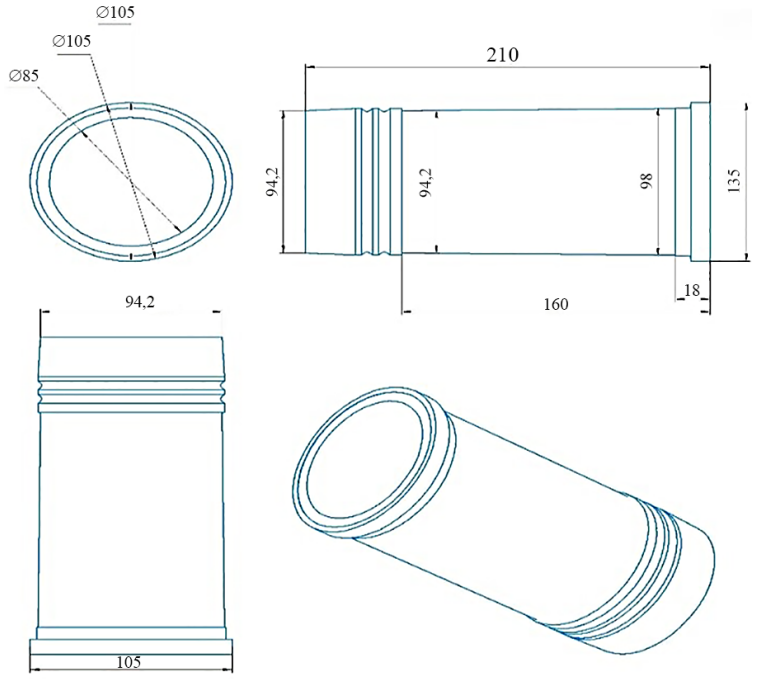


Рис. 1. Втулка цилиндров СМД 4Ч8,5/11
Fig. 1. Cylinder liner of the SMD 4Ch 8.5/11 diesel engine

ВЦ исследуемого СМД изготавливаются из серого чугуна СЧ25, который имеет временное сопротивление при растяжении $\sigma_в$ не менее 250 МПа. Массовая доля элементов в СЧ25 приведена в табл. 2 в соответствии с ГОСТом[2].

Таблица 2

Химические элементы, входящие в состав СЧ25 (%)

Table 2

Chemical composition of SCh25 gray cast iron (%)

C (углерод)	Si (кремний)	Mn (марганец)	S(сера)	P (фосфор)
3,2–3,4	1,4–2,2	0,7–1,0	До 0,15	До 0,2

[2] ГОСТ 1412–85. Чугун с пластинчатым графитом для отливок. Марки. М.: Издательство стандартов, 2004. 5 с.

Основные физические свойства СЧ25 представлены в табл. 3 [19].

Таблица 3

Физические свойства чугуна СЧ25

Table 3

Physical properties of SCh25 gray cast iron

Плотность ρ, кг/м^3	Линейная усадка *k*, %	Модуль упругости при растяжении, $E \cdot 10^3$ МПа	Удельная теплоемкость *c* при температуре 20–200 ºС, МДж/(кг·К)	Коэффициент линейного расширения при увеличении температуры от 20 до 200 ºС α, 1/ ºС	Тепло-проводность λ при 20 ºС, Вт/(м·К)
$7{,}2 \cdot 10^3$	1,2	От 900 до1100	500	$10 \cdot 10^{-6}$	50

Для наибольшей точности и корректности расчета изначально было выполнено упрощение 3D модели исследуемой втулки. Результатом является исключение избыточных геометрических данных и выполнение расчетов только для наружной и внутренней стенок ВЦ, так как именно на них осуществляется тепломеханическое воздействие. Упрощение 3D модели проводилось в среде SpaceClaim (рис. 2) в ПК Ansys.

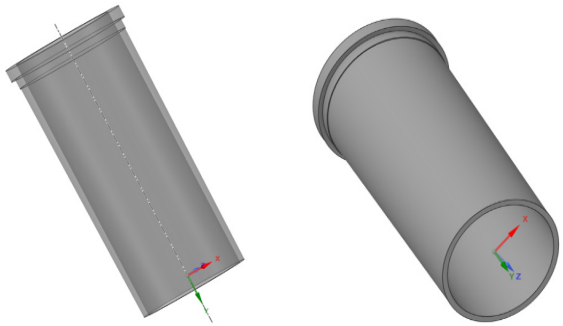


Рис. 2. Упрощенная модель ВЦ СМД 4Ч8,5/11 в среде SpaceClaim
Fig. 2. Simplified model of the cylinder liner of the SMD 4Ch 8.5/11 in SpaceClaim

Так как исследование проводилось численным методом с использованием МКЭ, была построена качественная сеточная модель. Для построения элементов использовалась среда Ansys Mesh с применением гексаэдрической сетки. Общее количество элементов на исследуемую 3D модель, составило 328860 (рис. 3). Качество сетки по показателю Element Quality составило: max — 1; min — 0,849; по показателю Skewness — max — 0,404; min — 0,00601. Таким образом, качество данной сетки должно максимально приблизить расчет к нагрузкам, испытываемым ВЦ в условиях эксплуатации.

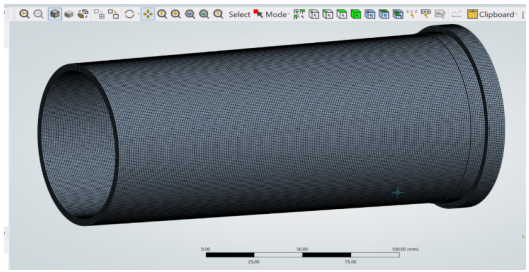


Рис. 3. Гексаэдрические конечные элементы,
созданные в среде Ansys Mesh на упрощенной 3D-модели ВЦ
Fig. 3. Hexahedral finite elements generated in Ansys Mesh on a simplified 3D model of the cylinder liner

В качестве данных о температурном состоянии зеркала цилиндра были использованы значения, полученные экспериментально для двигателя Ч 9,5/11 и представленные в работе [9]. Учитывая сходство модельного ряда исследуемых СМД, можно сделать вывод о возможности использования данных для двигателя 4Ч8,5/11. По результатам термометрирования наибольшая температура, наблюдаемая при работе двигателя на номинальной мощности при оборотах коленчатого вала 1500 мин$^{-1}$, составляла 215 ºС. Для задания граничных условий на поверхностях ВЦ и определения температурного поля внутри ВЦ температура на внешней поверхности втулки была принята равной 80 ºС, так как для данного модельного ряда СМД температура в полостях охлаждения ВЦ составляет от 72 до 82 ºС.

Исходя из устанавливаемых граничных условий, становится понятно, что это краевая задача теплопроводности первого рода, или задача Дирихле, где задается распределение температуры на границе поверхности тела. В общем случае для ее решения необходимо применение закона Фурье при стационарном режиме для цилиндрического тела:

$$Q(r) = -\lambda \frac{dt}{dx} F(r),$$

где $Q(r)$ = const — количество теплоты, проходящее через цилиндрическую поверхность радиусом r; dt/dx — градиент температуры; λ — коэффициент теплопроводности материала; $F(r)$ — площадь поверхности, соответствующая радиусу r.

Результатом проведенного расчета является распределение температур внутри ВЦ с учетом установленных граничных условий. Далее в процессе исследования к созданной модели были приложены действующие на ВЦ давления. Для задания давления использовалась индикаторная диаграмма, полученная в исследовании [18] при работе двигателя 4Ч8,5/11 на номинальной мощности с частотой вращения коленчатого вала 1500 мин$^{-1}$ (рис. 4).

Рис. 4. Индикаторная диаграмма СМД 4Ч8,5/11 при изменении давления в цилиндре, МПа
Fig. 4. Indicator diagram of the 4Ch8.5/11 marine diesel engine showing changes in cylinder pressure, MPa

Максимальное давление в цилиндре составляет 8,772 МПа. Данное значение давления было использовано при проведении расчетов по определению максимальных напряжений, возникающих в цилиндровой втулке в процессе эксплуатации. Для определения влияния давления в цилиндре были выполнены расчеты при 50 % максимального давления (4,380 МПа) и 25 % максимального давления (2,190 МПа), так как эти значения давлений соответствуют работе двигателя на долевых нагрузках.

В программном комплексе (ПК) Ansys уравнение статического анализа записывается в виде

$$[k]\{u\}=\{F\},$$

где [k] — матрица жесткостей; {u} — вектор перемещений; {F} — вектор сил.

Представленный вектор сил {F} может представлять собой различные виды расчетных нагрузок и напряжений, такие как давление, силы инерции, сосредоточенные силы и тепловые нагрузки.

Результаты (Results)

На первом этапе исследования было рассчитано распределение температурного поля в стенке исследуемой ВЦ (рис. 5).

а) б)

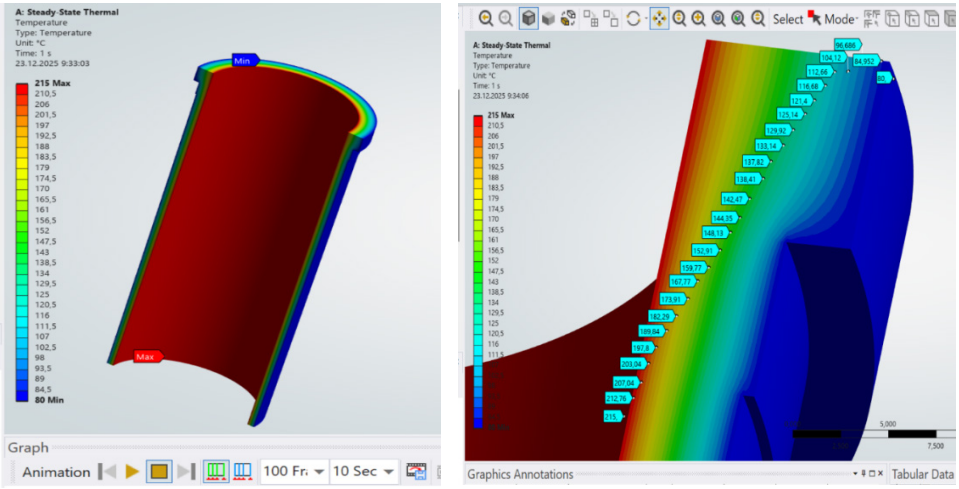


Рис. 5. Распределение температурного поля в ВЦ:
а — общее; *б* — в верхней части
Fig. 5. Temperature field distribution in the cylinder liner: *a* — overall view; *b* — upper part

На основании полученного температурного поля были рассчитаны тепловые потоки в исследуемой ВЦ, представленные на рис. 6.

а) б)

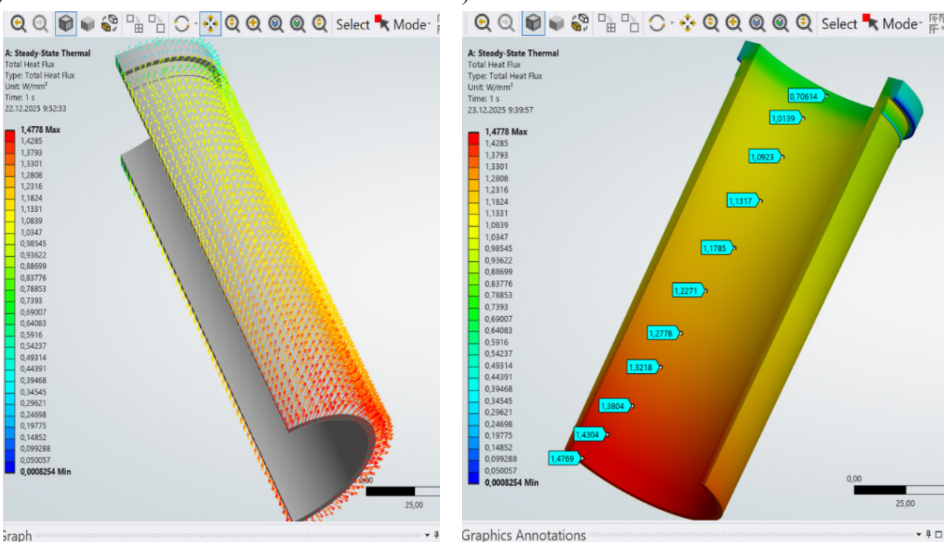


Рис. 6. Распределение тепловых потоков через ВЦ:
а — общее; *б* — на внутренней поверхности
Fig. 6. Heat flux distribution through the cylinder liner: *a* — overall distribution; *b* — on the inner surface

На втором этапе исследования полученные температурные поля учитывались для определения тепломеханических напряжений и деформаций, возникающих в результате совместного действия на ВЦ температур и давлений. На рис. 7 представлено распределение деформации ВЦ в мм.

а) б)

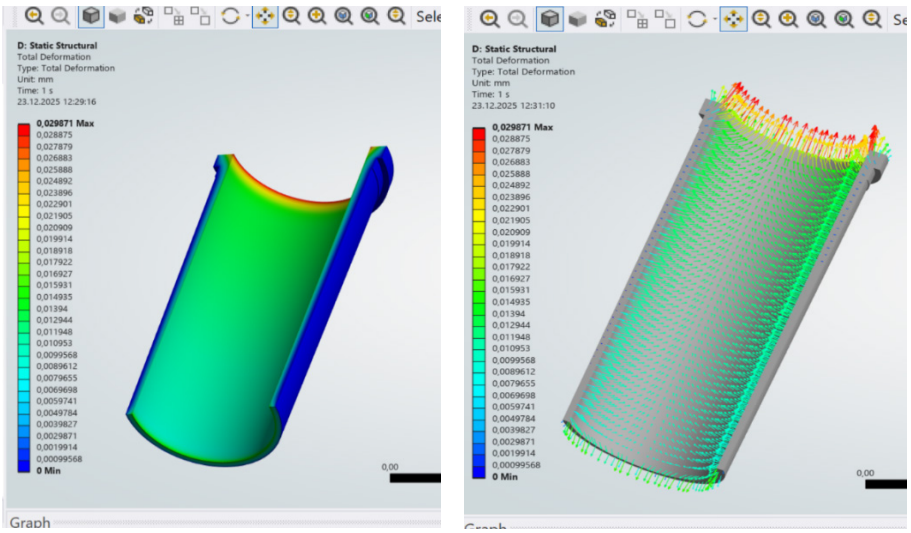


Рис. 7. Деформация втулки цилиндров дизеля 4Ч8,5/11 при работе на номинальной мощности:
а — общее распределение; *б* — направления деформаций
Fig. 7. Deformation of the cylinder liner of the 4Ch8.5/11 diesel engine operating at rated power:
a — overall distribution; *b* — deformation directions

Результаты расчетов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Оценка теплонапряженного состояния ВЦ СМД 4Ч8,5/11

Table 4

Assessment of the thermal-stress state of the cylinder liner of the 4Ch8.5/11 small-size marine diesel engine

Материал ВЦ	Максимальное давление в цилиндре двигателя, МПа	Максимальное значение общей деформации (Total Deformation), мм	Запас прочности (Safety Factor)	Коэффициент отношения напряжений (Stress ratio), %
СЧ25	2,19	0,0297	1,790	55,8
	4,38	0,0297	1,799	55,5
	8,772	0,0298	1,819	54,9

Исходя из данных, приведенных в табл. 4 и на рис. 7, можно утверждать, что при приложенных тепловых и механических воздействиях ВЦ испытывает допускаемые нагрузки (рис. 7), максимальная деформация, составляющая 0,0298 мм приходится на верхнюю часть ВЦ.

Вычисленные значения запаса прочности (табл. 4, рис. 8) показывают во сколько раз предельные напряжения превышают имеющиеся при действующих нагрузках. Запас прочности равный единице свидетельствует о нахождении конструкции на грани разрушения. Исходя из полученных результатов видно, что значения близкие к единице на ВЦ не присутствуют, что подтверждает ее высокую надежность при нагрузках, соответствующих режиму номинальной мощности.

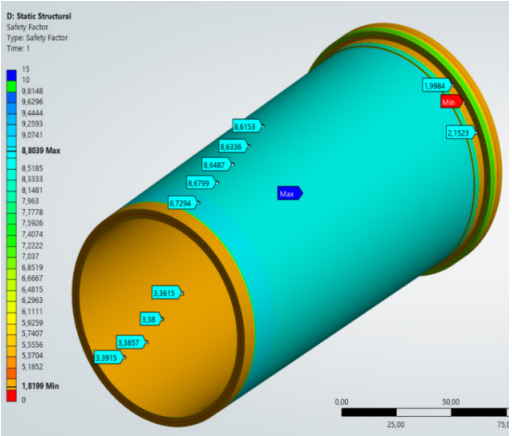


Рис. 8. Запас прочности (Safety Factor) ВЦ
(красным маркером отмечено место минимального значения,
синим — место максимального значения)
Fig. 8. Safety factor distribution in the cylinder liner: the red marker indicates the location
of the minimum value, and the blue marker indicates the location of the maximum value

В процессе изучения полученных данных было выявлено, что запас прочности с увеличением давления незначительно повышается. Это подтверждает упрочнение материала ВЦ из СЧ25 и его сжатие при оказываемых давлении и температуре, что вызывает незначительное повышение запаса прочности. Для хрупких материалов, таких как СЧ25, это вполне допустимо.

Области с минимальным запасом прочности под верхним буртом (см. рис. 8) подвержены наибольшим локальным нагрузкам и именно там будут возникать опасные зоны максимальных напряжений, вызванных тепломеханическими воздействиями, что в итоге может привести к разрушению ВЦ. Опасность возникновения разрушений возрастает в условиях периодических изменений действующих напряжений при работе СМД.

Полученные значения коэффициента напряжения (Stress Ratio) (см. табл. 4, рис. 9) показывают, насколько действующие напряжения отличаются от предельных, установленных для материала СЧ25.

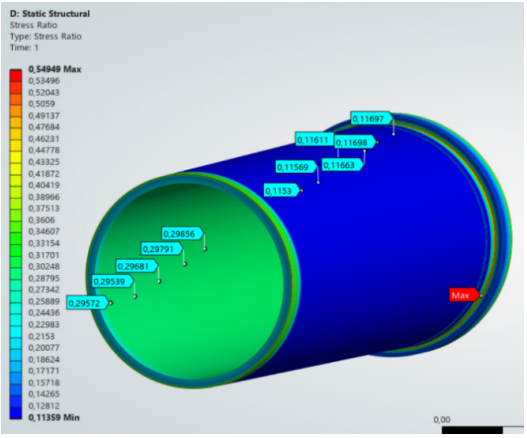


Рис. 9. Коэффициенты напряжения (Stress Ratio) в ВЦ
(красным маркером отмечено место максимального значения)
Fig. 9. Stress ratio distribution in the cylinder liner: the red marker indicates
the location of the maximum value

Значение, равное единице, свидетельствует о том, что материал достиг своего предела прочности. Проведенные исследования показали, что в условиях эксплуатации на ВЦ СМД 4Ч8,5/11 действуют напряжения, составляющие около 55 % от предельно допустимых для материала СЧ245 напряжений.

Обсуждение (Discussion)

В завершении работы была проведена валидация расчетов: выполнено сравнение действующих тепловых нагрузок с распределением температур, построенных в ПК Ansys (см. рис. 5). Распределение температур от 80 до 215 °С — такое же, как и установленное при проведении исследования, подтверждает адекватность воспроизведения ПК установленных тепловых нагрузок и корректное построение сетки конечных элементов для выполнения расчетов. Для валидации расчетов теплового потока было определено его значение аналитическим методом с применением закона Фурье. Разность значений с аналогичными, полученными с использованием ПК, не превышает 0,11 Вт/мм^2, что подтверждает достаточно высокую точность проведенных расчетов.

Результаты валидации подтвердили корректность полученных результатов численного моделирования теплонапряженного состояния цилиндровой втулки СМД 4Ч8,5/11 в процессе эксплуатации при работе в режиме номинальной мощности.

Предложенная методика моделирования напряженного состояния цилиндровых втулок дизельных двигателей в процессе эксплуатации позволяет при проектировании и модернизации двигателей оценивать запасы прочности втулок, рационально выбирать их конструктивные размеры, а также исследовать возможности использования новых материалов.

Выводы (Symmary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы

1. В результате проведенного численного моделирования определены температурное поле и тепловые потоки, проходящие через цилиндровую втулку, построено распределение имеющихся запасов прочности и коэффициентов напряжений в любой точке цилиндровой втулки.

2. Численное моделирование теплонапряженного состояния цилиндровой втулки СМД 4Ч8,5/11 показало, что данная деталь, изготовленная из ВЧ25, обладает достаточным запасом прочности и не ограничивает возможности форсирования двигателя.

3. Проведенный анализ позволил определить зоны ВЦ, которые потенциально являются наиболее подверженными разрушениям вследствие тепломеханических воздействий. Полученные данные следует использовать при конструктивной модернизации цилиндровых втулок с целью повышения их надежности.

4. Результаты проведенного исследования, полученные при статических тепловых и механических воздействиях на ВЦ, планируется использовать в последующих исследованиях, направленных на определение запаса прочности и долговечности ВЦ при циклических нагружениях.

5. Дальнейшие исследования с использованием созданной модели будут направлены на определение контактных напряжений, возникающих в цилиндропоршневой группе, в частности между поршневыми кольцами и зеркалом втулки цилиндра. Целью планируемых исследований является уточнение пределов возможного форсирования дизеля 4Ч8,5/11.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Жуков В. А.* Влияние износа деталей цилиндропоршневой группы дизеля на температурное состояние поршня / В. А. Жуков, О. В. Мельник, Л. В. Тузов // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 1040–1052. EDN YQXNKP. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1040-1052.

2. *Безюков О. К.* Охлаждение транспортных двигателей внутреннего сгорания / О. К. Безюков, В. А. Жуков, В. Н. Тимофеев. Санкт-Петербург: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, 2015. — 272 с. EDN WDPVTT.

3. *Кавтарадзе Р. З.* Локальный теплообмен в поршневых двигателях / Р. З. Кавтарадзе. Москва: Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 2016. — 520 с. EDN ZCOGVL.

4. *Синчурин Д. В.* Оценка развития методов и средств для определения напряженного состояния цилиндровых втулок / Д. В. Синчурин, Н. Л. Марьина // Россия молодая: передовые технологии — в промышленность. — 2011. — № 1. — С. 125–127. EDN RWRKHL.

5. *Леонтьев Л. Б.* Особенности изнашивания втулок цилиндров судовых среднеоборотных дизелей / Л. Б. Леонтьев, А. В. Погодаев, В. П. Болотова // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1088–1095. EDN LXNHDB. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1088-1095.

6. *Дорохов А. Ф.* Моделирование теплопередачи через стенку рабочего цилиндра поршневого ДВС и управление его напряженно-деформированным состоянием / А. Ф. Дорохов, Н. В. Пахомов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2015. — № 1(45). — С. 68–74. EDN TQAQJJ.

7. *Санаев Н. К.* Судовые малоразмерные дизели: конструкторско-технологические аспекты обеспечения технического уровня / Н. К. Санаев. — Санкт-Петербург: Политехника, 2010. — 181 с. EDN QNWLFR.

8. Охлаждающие жидкости транспортных ДВС : монография / О. К. Безюков, В. А. Жуков ; Федеральное агентство морского и речного транспорта, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций». — Санкт-Петербург: СПГУВК, 2009. — 262 с. EDN QNVVMV.

9. *Горшков Р. В.* Снижение температуры гильзы цилиндра за счет применения теплоносителя с высокотеплопроводными наночастицами мультиграфена / Р. В. Горшков // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2019. — № 3. — С. 56–62. EDN HGZRTE. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-3-56-62.

10. *Dere C.* Effect analysis on energy efficiency enhancement of controlled cylinder liner temperatures in marine diesel engines with model based approach / C. Dere, C. Deniz // Energy Conversion and Management. — 2020. — Vol. 220. — Pp. 113015. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113015.

11. Тепловая напряженность крышек цилиндров двигателей, конвертируемых в судовые / А. А. Ивнев, В. А. Жуков, Ю. Е. Хрящев, А. И. Яманин // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2021. — № 2. — С. 55–64. EDN MYBSTD. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-2-55-64.

12. *Стенин В. А.* Моделирование тепловых процессов в футеровке судового котла / В. А. Стенин, И. В. Ершова, В. А. Жуков // Морские интеллектуальные технологии. — 2021. — № 4-1(54). — С. 112–116. EDN LZRQNL. DOI: 10.37220/MIT.2021.54.4.040.

13. *Жуков В. А.* Цифровые технологии при проектировании элементов судовой и корабельной энергетики / В. А. Жуков, О. В. Мильтрат, И. В. Ершова // Судостроение. — 2023. — № 1(866). — С. 24–30. EDN YHPIAJ.

14. Thermal Analysis of Advanced IC Engine Cylinder / K. B. Sai Sanjana, K. Sai Mounika, T. Raja Santhosh Kumar, D. V. Srikanth // International Journal of Automobile Engineering Research and Development (IJAuERD). — 2016. — Vol. 6. — Is. 3. — Pp. 17–22.

15. *Krishna S. S.* Modeling and Thermal Analysis of Engine Cylinder Fin Body by Varying Materials / S. S. Krishna, S. Ahamed // International Journal \ & Magazine of Engineering, Technology, Management and Research. — 2016. — Vol. 3. — Is. 6. — Pp. 372–378.

16. *Лагода В. М.* Моделирование напряженного состояния втулки цилиндра дизеля / В. М. Лагода, А. А. Кугашев // Вестник науки. — 2024. — Т. 4. — № 6(75). — С. 1308–1312. EDN ATVFUL.

17. *Яманин А. И.* Силовой анализ поршневого двигателя с использованием динамических моделей кривошипно-шатунного механизма / А. И. Яманин, В. А. Жуков, С. О. Барышников // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 191–200. EDN YTXVXU. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-191-200.

18. Изучение влияния нагрузок в цилиндре судовых малоразмерных дизелей на клапаны разных конструкций с применением динамического термомеханического расчета / А. З. Курбанов, Н. М. Вагабов, Н. К. Санаев, В. В. Егоров // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. — 2025. — Т. 4. — № 4(16). — С. 431–443. EDN FTWLPY. DOI: 10.52899/24141437_2025_04_431.

REFERENCES

1. Zhukov, V. A., O. V. Mel'nik and L. V. Tuzov. "The influence of the wear of diesel's cylinder group on the temperature state of piston." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.5 (2018): 1040–1052. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1040-1052.

2. Bezyukov, O. K., V. A. Zhukov and V. N. Timofeev. *Okhlazhdenie transportnykh dvigateley vnutrennego sgoraniya.* Sankt-Peterburg: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova, 2015: 272.

3. Kavtaradze, R. Z. *Lokal'nyy teploobmen v porshnevykh dvigatelyakh.* Moskva: Moskovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet im. N.E. Baumana, 2016: 520.

4. Sinchurin, D. V. and N. L. Mar'ina. "Otsenka razvitiya metodov i sredstv dlya opredeleniya napryazhennogo sostoyaniya tsilindrovykh vtulok." *Rossiya molodaya: peredovye tekhnologii – v promyshlennost'* 1 (2011): 125–127.

5. Leont'ev, L. B., A. V. Pogodaev and V. P. Bolotova. "Features of wear of cylinder liners of marine medium-speed diesel engines." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 11.6 (2019): 1088–1095. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1088-1095.

6. Dorokhov, A. F. and N. V. Pakhomov. "Heat transfer through the walls of the piston ice working cylinder simulation and management of its stress-strain condition ." Modern Technologies. System Analysis. Modeling 1(45) (2015): 68–74.

7. Sanaev, N. K. *Sudovye malorazmernye dizeli: konstruktorsko-tekhnologicheskie aspekty obespecheniya tekhnicheskogo urovnya.* Sankt-Peterburg: Politekhnika, 2010: 181.

8. Bezyukov, O. K., V. A. Zhukov ; O. K. Bezyukov, V. A. Zhukov ; Federal'noe agentstvo morskogo i rechnogo transp. and Federal'noe gos. obrazovatel'noe uchrezhdenie vyssh. prof. obrazovaniya "Sankt-Peterburgskiy gos. un-t vodnykh kommunikatsiy". *Okhlazhdayuschie zhidkosti transportnykh DVS : monografiya.* Sankt-Peterburg : SPGUVK, 2009: 262.

9. Gorshkov, R. V. "Reducing temperature of cylinder liner due to application of heat carrier with high-conductive multigraphene nanoparticles ." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 3 (2019): 56–62. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-3-56-62.

10. Dere, C. and C. Deniz. "Effect analysis on energy efficiency enhancement of controlled cylinder liner temperatures in marine diesel engines with model based approach." *Energy Conversion and Management* 220 (2020): 113015. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113015.

11. Ivnev, A. A., V. A. Zhukov, Yu. E. Khryaschev and A. I. Yamanin. "Thermal tension of cylinder covers of transport diesel engines converted to marine diesels." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2021): 55–64. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-2-55-64.

12. Stenin, V. A., I. V. Ershova and V. A. Zhukov. "Simulation of thermal processes in the lining of the ship's boiler." *Marine Intellectual Technologies* 4-1(54) (2021): 112–116. DOI: 10.37220/MIT.2021.54.4.040.

13. Zhukov, V. A., O. V. Mil'trat and I. V. Ershova. "Application of digital technologies for designing components of ship borne power systems." *Shipbuilding* 1(866) (2023): 24–30.

14. Sai, K. B., K. Sai Mounika, T. Raja Santhosh Kumar and D. V. Srikanth. "Thermal Analysis of Advanced IC Engine Cylinder." *International Journal of Automobile Engineering Research and Development (IJAuERD)* 6.3 (2016): 17–22.

15. Krishna, S. S. and S. Ahamed. "Modeling and Thermal Analysis of Engine Cylinder Fin Body by Varying Materials." *International Journal & Magazine of Engineering, Technology, Management and Research* 3.6 (2016): 372–378.

16. Lagoda, V. M. and A. A. Kugashev. "Simulation of stress state of a diesel cylinder sleeve." *Science Bulletin* 4.6(75) (2024): 1308–1312.

17. Yamanin, A. I., V. A. Zhukov and S. O. Baryshnikov. "Force analysis of reciprocating engine using dynamic models of crank mechanism." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.1 (2018): 191–200. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-191-200.

18. Kurbanov, A. Z., N. M. Vagabov, N. K. Sanaev and V. V. Egorov. "Dynamic thermomechanical analysis: analyzing the influence of loads in cylinders of small-sized marine diesel engines on valves of different designs." *Transactions of The St. Petersburg State Marine Technical University* 4.4(16) (2025): 431–443. DOI: 10.528 99/24141437_2025_04_431.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Санаев Надир Кельбиханович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», филиал в г. Каспийске
368305, Республика Дагестан, г. Каспийск, ул. Алферова, д. 3
e-mail: *kaspijskfilial@dstu.ru*

Егоров Валентин Валентинович —
аспирант
ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», филиал в г. Каспийске
368305, Республика Дагестан, г. Каспийск, ул. Алферова, д. 3
e-mail: *kaspijskfilial@dstu.ru*

Жуков Владимир Анатольевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *zhukovva@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sanaev, Nadir K. —
PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Dagestan State Technical University, branch in Kaspiysk
3, Alferova Str., Dagestan, Kaspiysk, 368305, Russian Federation
e-mail: *kaspijskfilial@dstu.ru*

Egorov, Valentin V. —
Postgraduate Student
Dagestan State Technical University, branch in Kaspiysk
3, Alferova Str., Dagestan, Kaspiysk, 368305, Russian Federation
e-mail: *kaspijskfilial@dstu.ru*

Zhukov, Vladimir A. —
Grand PhD in Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7, Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: *zhukovva@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию: 11 марта 2026 г.
Received: March 11, 2026.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-487-500 **EDN VZUZFL**

УДК 621.43.074

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ: ОГРАНИЧЕНИЕ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ АЗОТА МЕТОДАМИ СЕЛЕКТИВНОГО КАТАЛИТИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Г. Е. Живлюк, А. П. Петров

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

Объектом настоящего исследования являются системы обеспечения экологической безопасности судовых двигателей внутреннего сгорания, в частности технологии ограничения выбросов оксидов азота (NO_x*). Акцент в работе делается на системы селективного каталитического восстановления как наиболее апробированной и распространенной технологии сокращения выбросов* NO_x *с отработавшими газами судового дизеля, используемой в судовой технике для достижения соответствия требований нормативов экологической безопасности Международной морской организации. В работе приведены действующие требования по сокращению выбросов* NO_x *для различных регионов судоходства. Проанализированы основные теоретические аспекты каталитических реакций восстановления оксидов азота и организации условий их протекания. Отдельное внимание уделено вопросам обеспечения температурных условий протекания реакций систем селективного каталитического восстановления, выделены границы ограничений и определены причины их возникновения. Рассмотрены компоновочные схемы, изложены особенности функционирования систем селективного каталитического восстановления высокого и низкого давления, сопоставлены их достоинства и недостатки. Отмечается, что системы низкого давления являются наиболее предпочтительными для модернизации судовых энергетических установок ввиду их полной автономности в конструкции судовых энергетических установок, несмотря на потенциальные недостатки в части поддержания требуемых температурных условий протекания реакции восстановления. Уделено внимание вспомогательным подсистемам обеспечения работы системы селективного каталитического восстановления оксидов азота, дано описание их особенностей. Приводятся некоторые расчетные данные по эксплуатационным затратам системы селективного каталитического восстановления, включая затраты на дополнительный расход топлива двигателем, используемые реагенты, возросшее потребление электрических мощностей судовых энергетических установок, расходные материалы и др. Сделаны выводы об эффективности использования технологии системы селективного каталитического восстановления в сравнении с альтернативными технологиями обеспечения требований действующей нормативной базы по экологической безопасности судовых энергетических установок.*

Ключевые слова: судовые энергетические установки, дизельные двигатели, экологическая безопасность, выбросы вредных веществ, оксиды азота, технологии каталитического восстановления, восстановитель оксидов азота, рециркуляция отработавших газов, техническое регулирование, эксплуатационные расходы.

Для цитирования:
Живлюк Г. Е. Экологическая безопасность судовых дизельных двигателей. Ограничение выбросов оксидов азота методами селективного каталитического восстановления / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 3. С. 487–500. EDN VZUZFL. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-487-500.

ENVIRONMENTAL SAFETY OF MARINE DIESEL ENGINES: REDUCTION OF NITROGEN OXIDES EMISSIONS BY SELECTIVE CATALYTIC REDUCTION

G. E. Zhivlyuk, A. P. Petrov

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

The object of this study is systems for ensuring the environmental safety of marine internal combustion engines, in particular, technologies for limiting nitrogen oxides (NO_x) *emissions. The focus is on selective*

catalytic reduction (SCR) systems as the most tested and widely used technology for reducing NO_x *emissions in marine diesel exhaust gases, used in marine engineering to comply with the environmental safety requirements of the International Maritime Organization (IMO). The paper presents current requirements for reducing* NO_x *emissions in different navigation areas. The main theoretical aspects of catalytic reactions for nitrogen oxides reduction and the organization of the conditions required for these reactions are analyzed. Special attention is paid to ensuring the temperature conditions required for SCR reactions; the operating limits are identified, and the causes of these limitations are determined. The article considers arrangement layouts, describes the operating features of high- and low-pressure SCR systems, and compares their advantages and disadvantages. It is noted that low-pressure systems are the most preferable for the modernization of marine power plants because they can be integrated as autonomous systems, despite their potential drawbacks related to maintaining the temperature conditions required for the reduction reaction. Attention is paid to auxiliary subsystems supporting the operation of selective catalytic reduction systems for nitrogen oxides, and their features are described. Some calculated data on the operating costs of the SCR system are provided, including additional engine fuel consumption, the reducing agents used, increased electrical power consumption by marine power plants, consumables, and other operating costs. Conclusions are drawn regarding the effectiveness of SCR technology in comparison with alternative technologies for meeting the requirements of the current regulatory framework for the environmental safety of marine power plants.*

Keywords: marine power plants; diesel engines; environmental safety; emissions of harmful substances; nitrogen oxides; selective catalytic reduction technologies; NO_x *reducing agent; exhaust gas recirculation; technical regulation; operating costs.*

For citation:
Zhivlyuk, Grigory E. and A. P. Petrov. "Environmental safety of marine diesel engines: reduction of nitrogen oxides emissions by selective catalytic reduction." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.3 (2026): 487–500. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-487-500.

Введение (Introduction

Экологическая безопасность судовых двигателей внутреннего сгорания (СДВС) постоянно находится под пристальным вниманием разработчиков и контролем законодательных органов, нормирующих вредные выбросы, производимые судовыми энергетическими установками (СЭУ).

Высокие температуры, реализуемые в локальных зонах камеры сгорания дизельного двигателя, в экспоненциальной зависимости инициируют рост скорости образования оксидов азота (NO_x). Специфика протекания процесса сгорания в дизельном двигателе предопределяет такую ситуацию, когда оксиды азота в составе отработавших газов оказываются основной составляющей суммарных вредных выбросов. Характерным является то, что образование оксидов азота практически не зависит от элементного состава используемого топлива, поскольку реагенты входят в состав воздуха, подаваемого в цилиндр. При этом образование иных вредных компонентов из состава отработавших газов, к которым относят оксиды серы, несгоревшие углеводороды и твердые частицы, в значительной мере определяется составом используемого топлива. Из анализа механизмов образования NO_x в камере сгорания дизельного двигателя [1] следует, что основной направленностью воздействия на рабочие процессы двигателя по сокращению выбросов оксидов азота является всемерное сокращение максимума температур в локальных зонах и в процессе в целом.

Сдерживание роста температурных максимумов за счет непосредственного (управление процессами топливоподачи, смесеобразования и т. д.) и опосредованного воздействия (введение в состав рабочего тела компонентов, обладающих высокой теплоемкостью, снижение концентрации кислорода в подаваемом воздухе и др.) на протекание процесса тепловыделения находится в противоречии с возможностью достижения высокой топливной экономичности теплового двигателя в соответствии с теоремой Карно. Одновременно использование таких технологий требует проведения дополнительных мероприятий по доводке рабочих процессов в двигателе, а в некоторых случаях и по изменению конструкции двигателя, которые может осуществить только изготовитель.

Эффективность методов в плане достижения действующих требований и ограничений не всегда однозначна. Наибольшую эффективность проявляют системы рециркуляции отработавших газов (EGR) как технология, совмещающая два фактора влияния: сокращение концентрации кислорода за счет подмешивания продуктов сгорания в состав свежего заряда цилиндра, тем самым снижая

скорость протекания процесса сгорания, сдерживающую рост температур цикла, и введение в рабочее тело компонентов из состава отработавших газов, обладающих высокой теплоемкостью: водяного пара и диоксида углерода. Технология EGR, по данным исследований [2–4], позволяет достигать соответствия требованиям самых жестких ограничений по выбросам оксидов азота и рассматривается как эффективный способ ограничения выбросов NO_x.

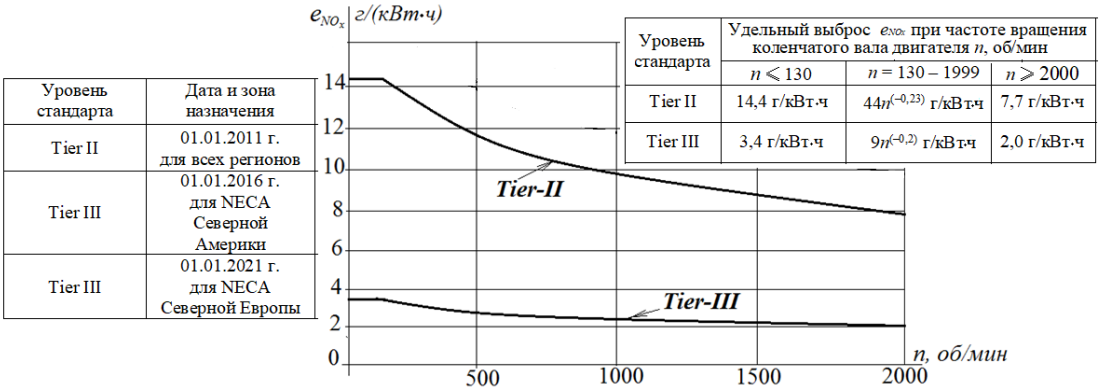
Наряду с методами непосредственного или опосредованного воздействия на условия образования NO_x предметом внимания производителей СДВС и операторов флота находятся периферийные способы очистки отработавших газов, не оказывающие негативного влияния на протекания внутрицилиндровых процессов и в первую очередь организация условий протекания реакций восстановления оксидов азота. Основной технологией, базирующейся на этом методе, является селективное каталитическое восстановление NO_x (SCR). EGR и SCR рассматриваются как две конкурирующие технологии, способные обеспечивать достижение третьего уровня экологических стандартов Международной морской организации (ИМО) Tier III, применимого к отдельным районам плавания — зонам контроля эмиссии NO_x (NECA)[1].

Целью работы является рассмотрение возможностей и анализ технической эффективности систем селективного каталитического восстановления оксидов азота в соответствии с требованиями, предъявляемыми к экологической безопасности СЭУ.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Селективное каталитическое восстановление как процесс преобразования оксидов азота в молекулярный двухатомный азот и воду посредством восстановителя, в качестве которого выступает аммиак (NH_3), было запатентовано в 1957 г. в США корпорацией Энгельхард (Engelhard Corporation) [5]. Первоначально эта технология, разрабатываемая для стационарных установок (тепловые электростанции, котлы в химической промышленности, заводы по переработке бытовых отходов, коксовые печи и т. д.), была применена в Японии в конце 1970-х гг., а с середины 1980-х гг. получила распространение в Европе и США [6]. Большие размеры и стационарные режимы работы СЭУ позволили быстро адаптировать системы SCR для судовых двигателей. Так, в 1989 г. SCR были задействованы для судовых двигателей MAN B&W мощностью 8 МВт, в 1992 г. — для двигателя Wartsila 6R32E на пароме «Аврора Хельсингборг» [7]. Параллельно технология SCR рассматривалась к применению для двигателей железнодорожного транспорта [8]. Серийное производство SCR для дизельных двигателей автомобильной промышленности было налажено позднее (в начале XXI в.) [9].

Для двигателей судового назначения системы селективного каталитического восстановления позволяют гарантированно снизить выбросы оксидов азота до уровня, соответствующего требованиям Tier III (см. рис. 1), и тем самым обеспечить возможность судам осуществлять свою деятельность в зонах контроля NECA.



Уровень стандарта	Дата и зона назначения
Tier II	01.01.2011 г. для всех регионов
Tier III	01.01.2016 г. для NECA Северной Америки
Tier III	01.01.2021 г. для NECA Северной Европы

Уровень стандарта	Удельный выброс e_{NO_x} при частоте вращения коленчатого вала двигателя n, об/мин		
	$n \leqslant 130$	$n = 130 – 1999$	$n \geqslant 2000$
Tier II	14,4 г/кВт·ч	$44n^{(-0,23)}$ г/кВт·ч	7,7 г/кВт·ч
Tier III	3,4 г/кВт·ч	$9n^{(-0,2)}$ г/кВт·ч	2,0 г/кВт·ч

Рис. 1. Действующие ограничения по выбросам оксидов азота
Fig. 1. Current NOx Emission Limits

[1] Руководство по применению положений Международной конвенции МАРПОЛ 73/78 / Российский морской регистр судоходства. СПб.: ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 2019. 106 с.

В качестве реагента в системах SCR могут использоваться некоторые азотосодержащие восстановители; наиболее распространенными являются безводный аммиак, водный раствор аммиака или раствор мочевины. По условиям хранения восстановителей, с учетом их потенциальной опасности для человека и окружающей среды, наиболее безопасными являются растворы мочевины, известные как AdBlue, содержащие 31,8–33,2 % (по весу) высокоочищенной мочевины и деминерализованной воды в соответствии с государственным стандартом[2]. Концентрация раствора мочевины, установленная ГОСТом, соответствует минимальной температуре замерзания реагента, которая при концентрации 32,5 % равна –11 °С. При увеличении, так же как и при уменьшении концентрации раствора реагента, температура кристаллизации увеличивается в соответствии с рис. 2 согласно ГОСТ Р ИСО 22241-1-2012.

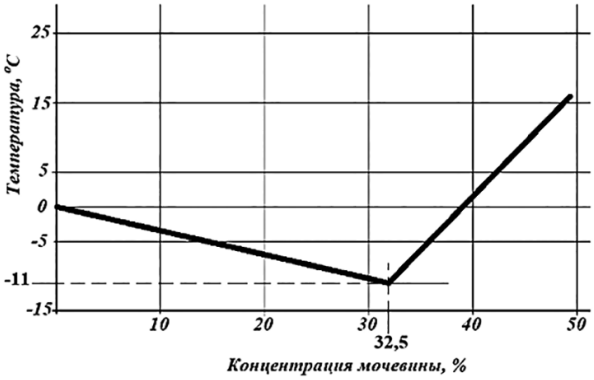


Рис. 2. Температурная зависимость кристаллизации раствора мочевины
Fig. 2. Crystallization of a Urea Solution as a Function of Temperature

Учитывая то обстоятельство, что в условиях машинного помещения воздействие отрицательных температур крайне маловероятно, для судовых SCR возможно использование более концентрированных растворов — до 40 % мочевины с температурой кристаллизации, близкой к 0 °С. В случае замерзания раствора его свойства после нагрева и рекристаллизации восстанавливаются.

Катализаторы могут изготавливаться сотовыми, пластинчатыми или гофрированными конструкциями из пористых керамических материалов, используемых в качестве основы-носителя. Катализаторы сотового типа состоят из экструдированной керамики, нанесенной равномерно на носитель или подложку. Катализаторы сотовой структуры отличаются большой активной поверхностью при малых габаритах, но обладают высоким гидравлическим сопротивлением и в значительной мере подвержены облитерации. Напротив, катализаторы пластинчатого типа создают меньший перепад давления, менее подвержены засорению, чем сотовые, но при этом имеют большие габариты и стоимость.

Структурные элементы реактора SCR изготавливают на основе пористых керамических материалов, например, оксида титана. В качестве активных каталитических компонентов реакции восстановления оксидов азота могут использоваться оксиды ванадия, молибдена и вольфрама, цеолиты и др. [10]. Активные компоненты с оксидами ванадия и вольфрама широко применимы по причине их относительно низкой стоимости, высокого каталитического потенциала и хорошей работоспособности в температурных диапазонах, характерных для большинства режимов работы дизельных энергетических установок. Однако такие катализаторы не обладают высокой термической стойкостью.

Цеолитные катализаторы проявляют более высокую термическую стойкость и способны поддерживать длительную работоспособность при температурах 630 °С, а кратковременно — до 850 °С, что является актуальным при установки сажевых фильтров с принудительной

[2] ГОСТ Р ИСО 22241-1–2012. Двигатели дизельные. Восстановитель оксидов азота AUS 32. Часть1: Требования к качеству. М. : ФГУП «Стандартинформ», 2013. 8 с.

регенерацией. Определенный потенциал может быть выявлен для применения железо- и медьобменных цеолитных катализаторов, способных обеспечить при определенных условиях соразмерную эффективность катализаторов на оксидах ванадия [11].

Каталитическое восстановление оксидов азота сводятся к следующим основным реакциям [12]:

$$2NO + 2NH_3 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow 2N_2 + 3H_2O;$$

$$NO_2 + 2NH_3 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow \frac{3}{2}N_2 + 3H_2O;$$

$$NO + NO_2 + 2NH_3 \rightarrow 2N_2 + 3H_2O.$$

Содержание серы в судовых топливах приводит к образованию диоксида серы SO_2, который может окисляться до триоксида (SO_3), особенно в каталитической среде, и при взаимодействии с водяным паром превращается в серную кислоту (H_2SO_4):

$$SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4.$$

В данном случае аммиак вступает в реакцию с триоксидом серы с образованием $(NH_4)_2SO_4$ и NH_4HSO_4:

$$NH_3 + SO_3 + H_2O \rightarrow NH_4HSO_4;$$

$$2NH_3 + SO_3 + H_2O \rightarrow (NH_4)_2SO_4.$$

Образующиеся соли серной кислоты: бисульфат аммония (NH4HSO4, гидросульфат аммония) и сульфат аммония ((NH4)2SO4), могут оседать на поверхности катализатора и приводить к его дезактивации при низких температурах отработавших газов, обычно ниже 250 °C при атмосферном давлении [13]. Причем эта температура имеет зависимость от давления газа, как показано на рис. 3. Кроме того, при температуре отработавших газов ниже 200 °C аммиак может вступать в реакцию с NO_2, образуя взрывоопасный нитрат аммония NH_4NO_3 [14]:

$$2NH_3 + 2NO_2 + H_2O \rightarrow NH_4NO_3 + NH_4NO_2,$$

который также может дезактивировать катализатор, оседая в жидкой или твердой фазе на поверхности каталитических элементов [15].

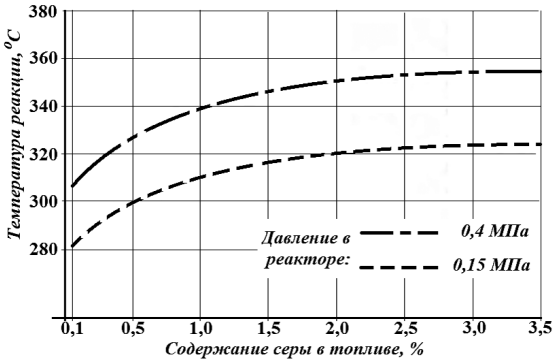


Рис. 3. Зависимость температуры дезактивации катализатора от содержания серы в топливе при различных давлениях [15]

Fig. 3. Catalyst Deactivation Temperature as a Function of Sulfur Content in Fuel at Different Pressures [15]

При использовании мочевины происходят следующие основные реакции:

$$3NO + CO(NH_2)_2 \rightarrow \frac{5}{2}N_2 + 2H_2O + CO_2;$$

$$3NO_2 + 2CO(NH_2)_2 \rightarrow \frac{7}{2}N_2 + 4H_2O + 2CO_2.$$

При наличии серы в топливе, как и в случае с аммиаком, происходят вторичные реакции, которые приводят к аналогичным последствиям, связанных с дезактивацией катализатора:

$$CO(NH_2)_2 + H_2SO_4 + H_2O \rightarrow (NH_4)_2SO_4 + CO_2;$$

$$CO(NH_2)_2 + 2H_2SO_4 + H_2O \rightarrow 2NH_4HSO_4 + CO_2.$$

Избежать дезактивации катализатора возможно за счет поддержания температурного режима реакции. Таким образом, температурные условия протекания реакций восстановления в системе SCR играют важную роль в настройке режимов работы системы.

Оптимальный температурный диапазон для наиболее эффективной скорости реакции каталитического восстановления оксидов азота составляет 300–450 °С, но этот оптимум зависит от выбранного катализатора, состава топлива и газа и может изменяться. Процесс может протекать и при более низких температурах (порядка 225 °С), однако это потребует более длительного пребывания реагентов в зоне реакции, при этом возрастают указанные ранее риски дезактивации катализатора. Экспериментальные данные, представленные Cummins Emission Solutions[3], показаны на рис. 4.

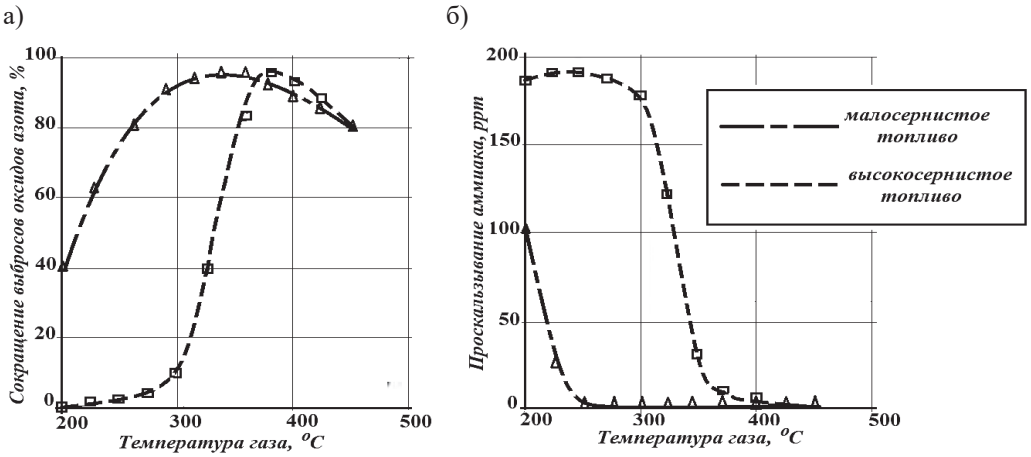


Рис. 4. Зависимости скорости реакции SCR (*а*) и проскальзывания аммиака (*б*) от температуры газа для топлив с различным содержанием серы
Fig. 4. SCR Reaction Rate (a) and Ammonia Slip (b) as Functions of Gas Temperature for Fuels with Different Sulfur Contents

Превышение оптимального диапазона температур реакции также нежелательно, поскольку может приводить к увеличению расхода реагента за счет окисления аммиака как горючего вещества, когда температура приблизится к 500 °С.

Поддержание температурного оптимума реакции обеспечивается конструктивными мерами: система SCR может быть скомпонована как система высокого (SCR-HP) или низкого (SCR-LP) давления (рис. 5).

Система SCR высокого давления целесообразна к применению на двухтактных малооборотных судовых дизелях из-за возможности обеспечения относительно высокой температуры процессов восстановления оксидов азота. Температура газов на выпуске в двухтактных двигателях оказывается ниже, чем в четырехтактных в связи с большим количеством холодного продувочного воздуха, попадающего на выпуск в процессе газообмена. В зависимости от нагрузки температурный перепад газа на турбине турбокомпрессора составляет 50–175 °С. В том случае, когда система SCR устанавливается перед турбиной, поддержание высоких температур реакций восстановления NO_x в широком диапазоне нагрузочных режимов работы двигателя представляется наиболее легким конструктивным решением.

[3] Руководство клиента по решениям Cummins для контроля выбросов. Scr-cummins-russian-version. 2013. 19 P.

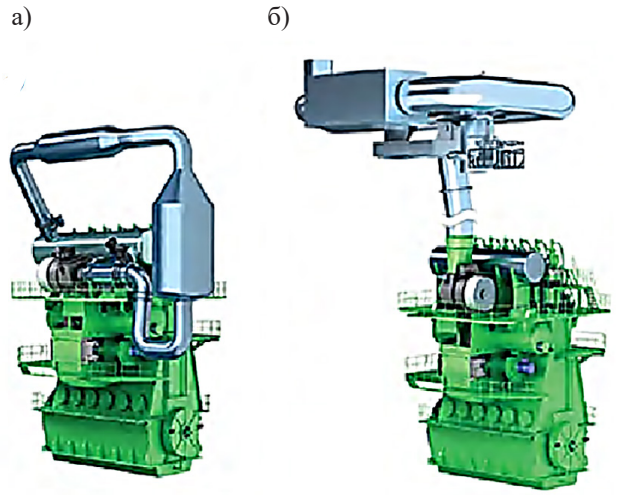


Рис. 5. Двухтактный малооборотный двигатель
с системой SCR-HP (*а*) и SCR-LP (*б*) [15]
Fig. 5. Two-Stroke Low-Speed Engine with an SCR-HP System (a) and an SCR-LP System (b) [15]

Процесс SCR-HP, схема которого показана на рис. 6, происходит в системе, установленной перед турбокомпрессором, и состоит из двух основных компонентов: комбинированного блока испарителя-смесителя и реактора SCR.

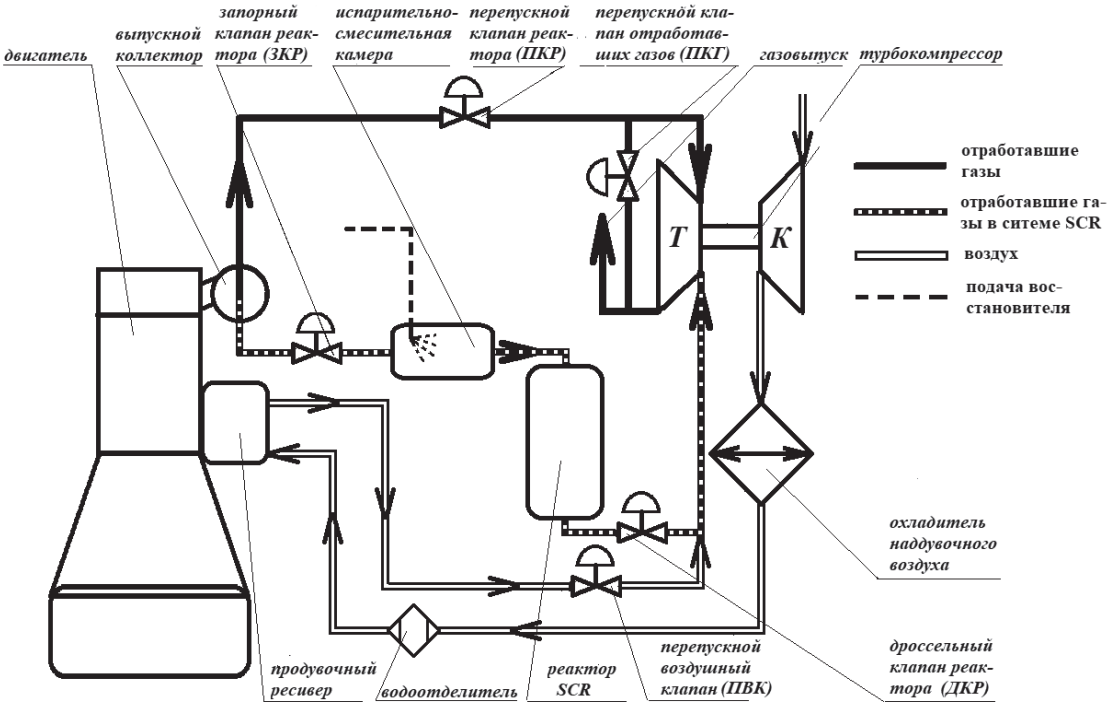


Рис. 6. Схема системы SCR высокого давления
Fig. 6. Schematic Diagram of a High-Pressure SCR System

Учитывая, что система SCR-HP, в отличие от SCR-LP, оперирует с меньшим объемом газа (находящимся под давлением), система высокого давления будет иметь умеренные габариты (см. рис. 5), но требует изменения конструкции двигателя в части газовыпуска. В тех случаях, когда внутренние настройки двигателя позволяют двигателю достичь соответствия требованиям стандарта TIER II при работе судна вне зон NECA, система SCR отключается закрытием запорного

клапана реактора (ЗКР) и дроссельного клапана реактора (ДКР), при этом перепускной клапан реактора (ПКР) должен быть в открытом состоянии и отработавшие газы поступают непосредственно в турбину турбокомпрессора. При входе судна в зону NECA перепуск отработавших газов, минуя систему SCR, отключается закрытием клапана ПКР, а клапаны ЗКР и ДКР открываются.

Несмотря на то что реактор расположен в зоне повышенных температур перед турбиной, при низких нагрузках двигателя температура отработавших газов может оказаться слишком низкой для протекания реакций SCR. Для достижения приемлемого температурного режима реакции в данном случае в конструкции системы предусматривается возможность перепуска воздуха из продувочного ресивера на вход в турбину. Байпас управляется перепускным воздушным клапаном (ПВК), при открытии которого уменьшается количество подаваемого в цилиндры воздуха, что влечет за собой снижение коэффициента избытка воздуха и, как следствие, рост температуры отработавших газов. Это позволяет поддерживать температурный уровень реакций SCR, однако приводит к ухудшению топливной экономичности двигателя. Так, на рис. 7 показаны диапазоны нагрузок, при которых необходимо открытие клапана ПВК для поддержания температурного уровня реакции. Очевидно, что диапазон открытия перепуска для нагрузок двигателя с относительно низкой температурой отработавших газов (двигатель *B*, см. рис. 7) будет шире, чем для двигателя с более высокой температурой отработавшего газа (двигатель *A* на рис. 7). Также диапазон открытия перепуска будет зависеть от количества серы в топливе. С учетом указанных обстоятельств диапазон открытия клапана ПВК может распространяться от минимальных мощностных режимов до режимов 75 % и более от номинальной мощности, как следует из рис. 7.

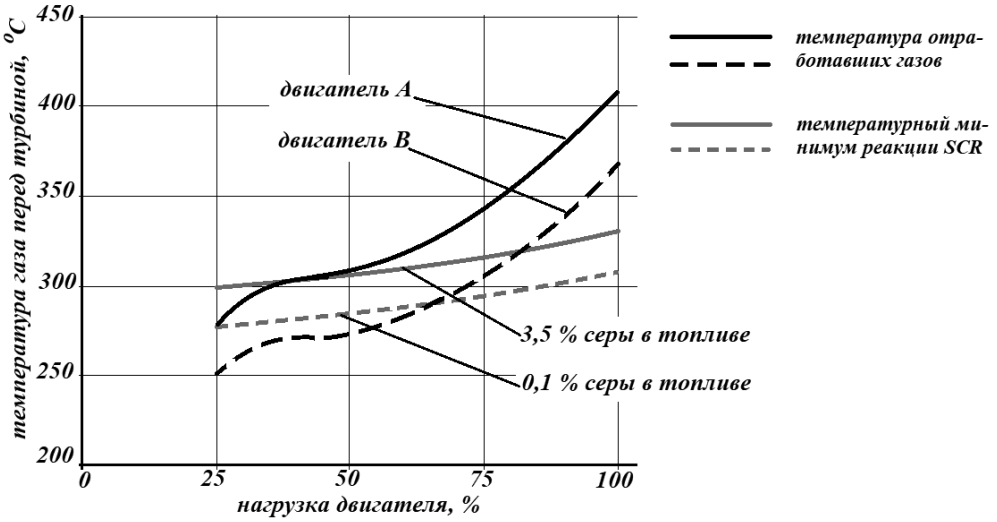


Рис. 7. Диапазон открытия перепуска воздуха для создания условий реакции SCR [15]
Fig. 7. Scavenge Air Bypass Opening Range Required to Ensure SCR Reaction Conditions [15]

В тех случаях, когда энергия отработавших газов оказывается избыточной и энергетический баланс между энергией, генерируемой турбиной и потребляемой компрессором нарушается в сторону увеличения мощности турбины турбокомпрессора, открывается перепускной клапан отработавших газов в целях восстановления энергетического и массового балансов.

Во избежание образования отложений в реакторе, связанных с низкой температурой реакции, система SCR отключается на режимах малых нагрузок. Минимальная мощность двигателя, при которой производится отключение системы SCR, составляет порядка 15 % и может существенно изменяться в зависимости от характеристик двигателя и качества используемого топлива [15].

Кроме того, реактор и испаритель обладают высокой теплоемкостью, что обуславливает задержку изменения температур между выпускным коллектором и входом в турбокомпрессор. Это может привести к нарушению расчетного массового баланса между подачей компрессора

и потреблением двигателя, создавая термическую нестабильность, особенно на переходных режимах. Во избежание такой нестабильности должны быть задействованы электроприводные воздухонагнетатели, которые будут поддерживать массовый баланс. Поскольку диапазон включения автономных воздухонагнетателей может предусматривать до 65 % мощности двигателя, мощность их привода должна быть увеличена по сравнению со стандартным двигателем. Пример компоновки системы SCR-HP Hitachi Zosen Corporation показан на рис. 8 (обозначения клапанов соответствуют приведенным на рис. 6).

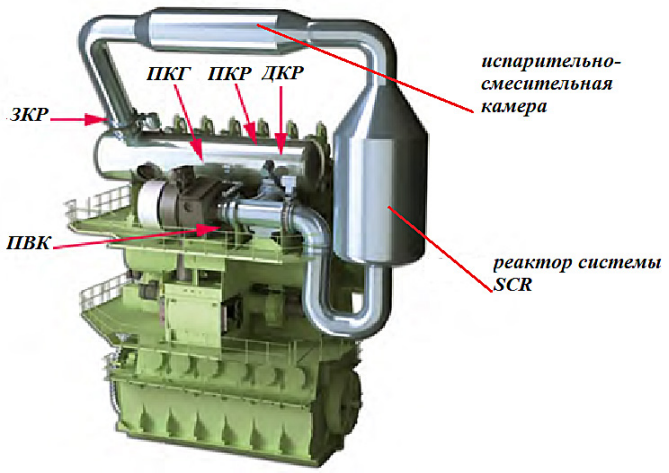


Рис. 8. Компоновка системы SCR-HP [15]
Fig. 8. Arrangement of the SCR-HP System [15]

Система SCR низкого давления выгодно отличается от SCR-HP в первую очередь тем, что не затрагивает конструкцию двигателя и поэтому оказывается привлекательной для модернизации силовой установки. Система состоит из трех основных элементов: реактора SCR, смесителя и блока подготовки восстановителя. Схема системы представлена на рис. 9.

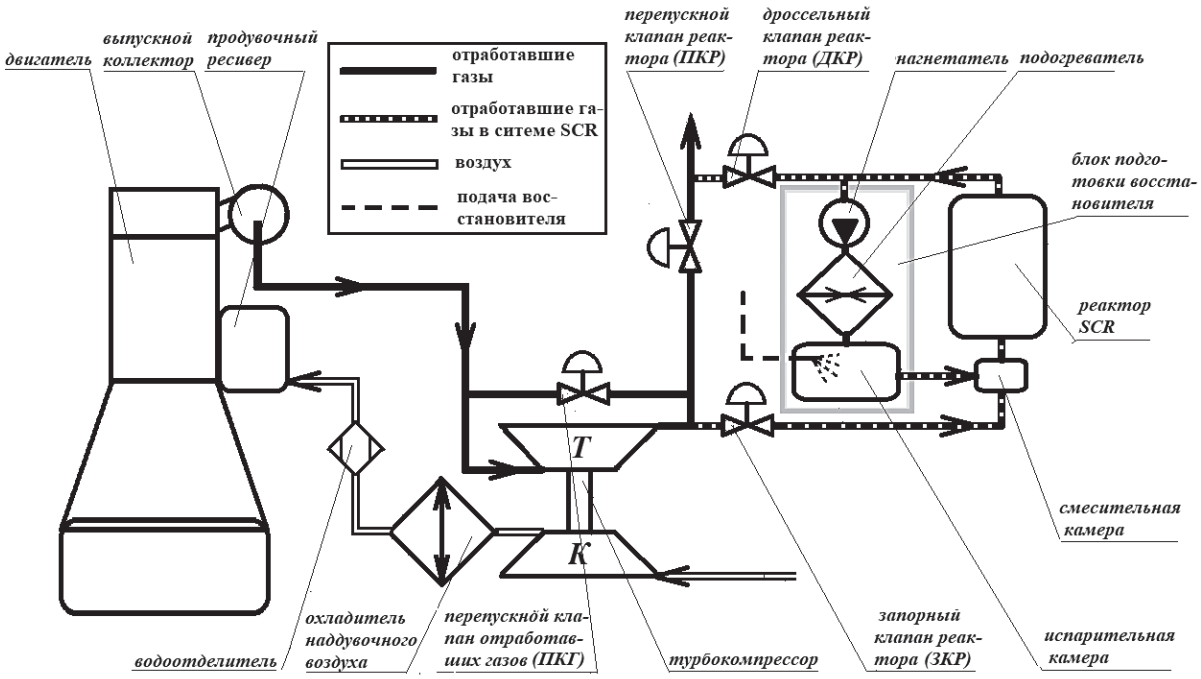


Рис. 9. Схема системы SCR низкого давления
Fig. 9. Schematic Diagram of a Low-Pressure SCR System

Управление системой SCR низкого давления аналогично SCR-HP. Для включения системы в работу должен быть перекрыт перепускной клапан реактора ПКР и открыты клапаны ЗКР и ДКР. Основное отличие систем состоит в обеспечении температурного режима реакции с учетом того, что температура газа, которым оперирует SCR-LP, оказывается существенно ниже, чем в системе высокого давления. Для поддержания температурного уровня реакции восстановления, особенно на низких нагрузках, в системе предусмотрен подогреватель газа, включенный в блок подготовки восстановителя. Таким образом, очищенные в реакторе от NO_x газы частично возвращаются в систему через блок подготовки. Газ в блок подается нагнетателем, далее проходит через подогреватель и поступает в испарительную камеру, где происходит подготовка реагента-восстановителя. Из блока подготовки газ поступает в смесительную камеру, где при необходимости подогретый и насыщенный восстановителем газ смешивается с основным потоком отработавших газов цилиндров двигателя и поступает в реактор SCR-LP.

На долевых нагрузках двигателя, а также в холодных условиях окружающей среды управление температурой отработавших газов двигателя производится перепускным клапаном отработавших газов. Для повышения температуры до требуемого уровня часть отработавших газов перепускается, минуя турбину турбокомпрессора, понижает его производительность, что приводит к уменьшению суммарного коэффициента избытка воздуха и, как следствие, к росту температуры отработавших газов. Такое регулирование приводит к некоторому увеличению, в пределах 0,5–2,0 г/кВт·ч, расхода топлива в зависимости от условий работы двигателя.

Пример компоновки системы SCR-LP производства Doosan Engine Corporation приведен на рис. 10. Система монтируется в магистраль выпуска отработавших газов, не требуя изменения конструкции газовыпускных трактов двигателя, в отличие от системы SCR высокого давления. Это обеспечивает гибкость при размещении системы и удобство использование системы SCR-LP в ходе модернизации энергетической установки под требования стандарта Tier III.

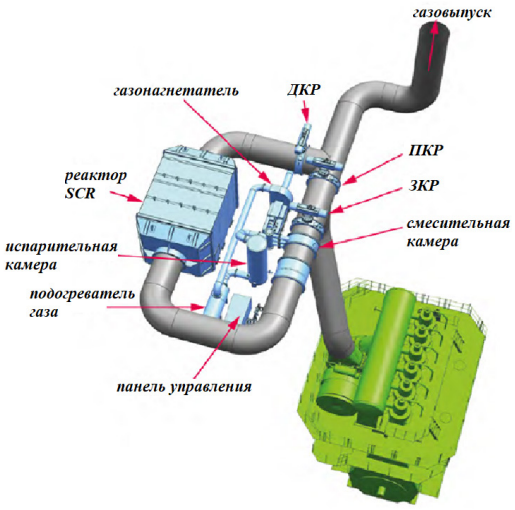


Рис. 10. Система SCR низкого давления [15]
Fig. 10. Arrangement of a Low-Pressure SCR System [15]

Системы SCR-LP и SCR-HP включают в свою конструкцию ряд вспомогательных подсистем. В первую очередь необходимо выделить подсистему хранения реагента-восстановителя, в качестве которого в большинстве случаев используется водный раствор мочевины (32,5 % или 40 %) или водный раствор аммиака (25 % NH_3). Несмотря на то, что применение мочевины требует более сложного процесса испарения и смешивания, что оказывает влияние на компоновку системы, для морских целей раствор мочевины оказывается более предпочтительным в связи с относительно низкими рисками использования и хранения на борту судна. В то же время аммиак, подаваемый в виде водного раствора, классифицируется как коррозионно-активный и вредный для здоровья

и окружающей среды, поэтому танк хранения и система подачи, включая испаритель, должны располагаться в отдельном помещении вдали от жилых помещений и машинного отделения.

Подсистема сжатого воздуха поддерживает две функции: обеспечение пневматического распыливания реагента и сажеобдув активной зоны реактора. Процесс продувки сажи предотвращает загрязнение элементов реактора и выполняется периодически в процессе работы системы SCR. Сажа выводится вместе с отработавшим газом в систему газовыпуска. Вне зависимости от выбранной схемы, технология способна обеспечивать восстановление 80 % и более NO_x до молекулярного азота при соблюдении ряда условий, к которым, в первую очередь, относится необходимость поддержания температуры протекания реакций на уровне 300–450 °С.

Учитывая, что реактор и испаритель системы SCR обладают значительной теплоемкостью, для сокращения времени выхода на расчетный температурный режим при вводе системы в работу предусматривается подсистема подогрева испарителя и реактора. Работа этой подсистемы инициируется заблаговременно, до включения в работу реактора в зоне NECA, а кроме того, при нахождении судна у причала или стоянки в порту температура реактора будет медленно снижаться, и работа подсистемы подогрева будет поддерживать температурное состояние на требуемом уровне для быстрого ввода системы в действие.

Подсистема управления базируется на показаниях датчиков постоянного контроля содержания NO_x в отработавших газах и является обязательной для всех систем SCR. Подсистема осуществляет управление соответствующими клапанами и указанными ранее подсистемами, обеспечивает дозирование подачи реагента и имеет интеграцию с системой управления двигателем.

В отличие от своего ближайшего конкурента (системы рециркуляции отработавших газов EGR), система SCR, вне зависимости от конструкции и компоновки, приводит к существенным дополнительным эксплуатационным расходам. В то время как для системы EGR дополнительные расходы обус-лавливаются в основном увеличением удельного эффективного расхода топлива до 4–5 % [1], эксплуатационные расходы систем SCR включают затраты на пополнение запасов восстановителя, сменные модули реактора, дополнительный расход топлива и электроэнергии, обслуживание системы и др. При этом только расходы на реагенты могут превысить 8 % от стоимости использованного топлива.

Данные по дополнительным затратам представлены в табличной форме по результатам расчетов энергетической установки балкера с двигателем MAN мощностью 16 440 кВт, оборудованного SCR-LP, предназначенной для работы на малосернистом топливе [15].

Структура эксплуатационных затрат на систему SCR

Structure of Operating Costs for the SCR System

Нагрузка двигателя, %, от длительной максимальной мощности	25 %	50 %	75 %	100 %
Удельный расход топлива в режиме TIER III, г/кВт·ч	166,8	158,0	157,5	162,0
Удельный расход топлива в режиме TIER II, г/кВт·ч	164,0	156,5	156,5	161,5
Увеличение удельного расхода топлива, г/кВт·ч	2,8	1,5	1,0	0,5
Увеличение часового расхода топлива, кг/ч	11,5	12,3	12,3	8,2
Дополнительный расход электроэнергии, кВт	82,2	82,2	82,2	82,2
Расход мочевины (раствор 40 %), л/ч	120	190	230	230

При этом дополнительные годовые расходы могут достигать:

– по используемому топливу — 7,0 т/год;

– по электроэнергии — 49,3 МВт/год;

– по восстановителю — до 110 $м^3$/год или для 40 % раствора мочевины — 17,9 г/кВт·ч (16,1 л/МВт·ч) и 16,6 г/кВт·ч (18,4 л/МВт·ч) для 24,5 % водного раствора аммиака.

Дополнительные затраты на замену структурных компонентов реактора зависят от срока службы катализатора, который определяется производителем и зависит от продолжительности работы системы SCR, нагрузки на двигатель, типа и объема реактора по сравнению с объемом цилиндров двигателя, качества используемого топлива и др.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы

1. Благодаря имеющемуся опыту использования и доступности на рынке система SCR в настоящее время объективно является лидером среди технологий обеспечения соответствия требований стандарта ИМО Tier III по выбросам оксидов азота судовыми энергетическими установками, выгодно отличаясь от своего ближайшего конкурента — системы рециркуляции отработавших газов EGR — возможностью интеграции в состав СЭУ без изменения конструкции и специальных настроек рабочего процесса дизельного двигателя.

2. Конструктивно система SCR может быть организована как система высокого или низкого давления. Вне зависимости от выбранной схемы, технология способна обеспечивать восстановление 80 % и более NO_x до молекулярного азота при соблюдении ряда условий, к которым, в первую очередь, относится необходимость поддержания температуры протекания реакций на уровне 300–450 °С. Более низкие температуры, менее 250 °С значительно снижают скорости протекания реакций восстановления и способны вызывать процессы дезактивации катализатора за счет облитерации поверхности катализатора бисульфатом аммония.

3. По сравнению с системой EGR, использование технологии селективного каталитического восстановления оксидов азота не приводит к существенному росту удельного эффективного расхода топлива и его увеличение ограничивается в пределах до 1–1,5 %, однако работа системы SCR сопряжена с возникновением ряда сопутствующих эксплуатационных затрат. В то время как работа EGR в основном связана с 4–5 % потери топливной экономичности при минимальных затратах на обслуживание системы, затраты только на расходуемый реагент для каталитической реакции восстановления оксидов азота составляют до 8 % от стоимости используемого топлива. Кроме того, к сопутствующим эксплуатационным затратам следует отнести дополнительный расход электроэнергии, затрачиваемой на работу механических воздухонагнетателей и обеспечение работы подсистем SCR, который оценивается не менее чем 5 кВт/МВт мощности установки, а также затраты на обслуживание системы, замену активных элементов реактора как расходных материалов и др.

4. Несмотря на относительно высокие эксплуатационные затраты систем SCR по сравнению с конкурирующими технологиями, селективное каталитическое восстановление, ввиду удобства интегрирования и адаптации, остается самой массовой и распространенной технологией для достижения соответствия требованиям третьего уровня стандартов ИМО по экологической безопасности СЭУ в части ограничения эмиссии оксидов азота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Живлюк Г. Е.* Эффективность ограничения выбросов оксидов азота системами рециркуляции отработавших газов судовых ДВС / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 845–857. EDN XPIVLD. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-845-857.

2. Технологии для достижения требований IMO Tier-III (по материалам конгресса CIMAC) // Двигателестроение. — 2020. — № 4(282). — С. 41–57. EDN DFCMVH.

3. *Петров А. П.* Технологии достижения новых требований по выбросам оксидов азота судовыми энергетическими установками / А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2021.

4. Development of an Integrated Control Strategy for engine and SCR system basedon effective EGR rate / F. D'Aniello, I. Arsie, C. Pianese, F. Stola // IFAC-PapersOnLine. — 2020. — Vol. 53. — Is. 2. — Pp. 14034–14039. DOI: 10.1016/j.ifacol.2020.12.925.

5. Antonio Santos. Advanced Motor Vehicle Emission Control Technology Celebrates 25th Anniversary / Antonio Santos // News Manufacturers of Emission Controls Association (MECA). Washington, DC. — 2020. — Pp.1–3.

6. Gibson J. Selective Catalytic Reduction on Marine Diesel Engines. / J. Gibson, O. Groene // Automotive Engineering. — 1991. — Pp. 18–22.

7. *Hug H. T.* Off-Highway Exhaust Gas After-Treatment:Combining Urea-SCR, Oxidation Catalysis and Traps / H. T. Hug, A. Mayer, A. Hartenstein // International Congress & Exposition SAE International, 1993. DOI: 10.4271/930363.

8. *Weaver C. S.* Emissions Control Technology for Locomotive Engines / C. S. Weaver, D. B. McGregor // International Congress & Exposition SAE International, 1994. DOI: 10.4271/940453.

9. Development of Urea-SCR System for Heavy-Duty Commercial Vehicles / K. Hirata, N. Masaki, H. Ueno, H. Akagawa // SAE 2005 World Congress & Exhibition SAE International, 2005. DOI: 10.4271/2005-01-1860.

10. Selective Catalytic Reduction of NOx with NH3 by Using Novel Catalysts: State of the Art and Future Prospects / L. Han, S. Cai, M. Gao, J-Y. Hasegawa, P. Wang, J. Zhang, L. Shi, D. Zhang // Chemical Reviews. — 2019. — Vol. 119. — Is. 19. — Pp. 10916–10976. DOI: 10.1021/acs.chemrev.9b00202.

11. Advanced Urea SCR Catalysts for Automotive Applications / J. Gieshoff, M. Pfeifer, A. Schäfer-Sindlinger, PC. Spurk, G. Garr, T. Leprince, M. Crocker // SAE 2001 World Congress SAE International, 2001. DOI: 10.4271/2001-01-0514.

12. *Willi R.* Selective reduction of NO by NH3 over vanadia-based commercial catalyst: parametric sensitivity and kinetic modelling / R. Willi, B. Roduit, R. A. Koeppel [et al.] // Chemical Engineering Science. — 1996. — Vol. 51. — Is. 11. — Pp. 2897–2902. EDN AIMPNK.

13. *Lepperhoff G.* Verhalten von SCR-Katalysatoren im dieselmotorischen Abgas / G. Lepperhoff, J. Schommers // MTZ Motortechnische Zeitschrift. — 1988. — Vol. 49. — Is. 1. — Pp. 21.

14. *Koebel M.* Selective catalytic reduction of NO and NO2 at low temperatures / M. Koebel, G. Madia, M. Elsener // Catalysis Today. — 2002. — Vol. 73. — Is. 3. — Pp. 239–247. DOI: 10.1016/S0920-5861(02)00006-8.

15. Emission project guide. MAN B&W Two-stroke Marine Engines. — Copenhagen SV, Denmark: MAN Energy Solutions, 2019. — 110 P.

REFERENCES

1. Zhivlyuk, G. E. and A. P. Petrov. "Efficiency of limiting nitrogen oxides emissions by exhaust gas recirculation systems of marine internal combustion engines." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 15.5 (2023): 845–857. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-845-857.

2. "Tekhnologii dlya dostizheniya trebovaniy IMO Tier-III (po materialam kongressa CIMAC)." *Dvigatelestroenie* 4(282) (2020): 41–57.

3. Petrov, A. P. and G. E. Zhivlyuk. "Technologies for achieving new requirements for emissions of nitrogen oxides by marine power plants." *Transactions of The Krylov State Research Centre* undefined (2021).

4. D'Aniello, F., I. Arsie, C. Pianese and F. Stola. "Development of an Integrated Control Strategy for engine and SCR system basedon effective EGR rate." *IFAC-PapersOnLine* 53.2 (2020): 14034–14039. DOI: 10.1016/j.ifacol.2020.12.925.

5. Antonio Santos. "Advanced Motor Vehicle Emission Control Technology Celebrates 25th Anniversary" *News Manufacturers of Emission Controls Association (MECA). – Washington, DC* (2020): 1–3.

6. Gibson J and O. Groene. "Selective Catalytic Reduction on Marine Diesel Engines" *Automotive Engineering.* (1991): 18–22.

7. Hug, H. T., A. Mayer and A. Hartenstein. "Off-Highway Exhaust Gas After-Treatment:Combining Urea-SCR, Oxidation Catalysis and Traps." *International Congress & Exposition*. SAE International, 1993. DOI: 10.4271/930363.

8. Weaver, C. S. and D. B. McGregor. "Emissions Control Technology for Locomotive Engines." *International Congress & Exposition*. SAE International, 1994. DOI: 10.4271/940453.

9. Hirata, K., N. Masaki, H. Ueno and H. Akagawa. "Development of Urea-SCR System for Heavy-Duty Commercial Vehicles." *SAE 2005 World Congress & Exhibition*. SAE International, 2005. DOI: 10.4271/2005-01-1860.

10. Han, L., D. Zhang et al. "Selective Catalytic Reduction of NOx with NH3 by Using Novel Catalysts: State of the Art and Future Prospects." *Chemical Reviews* 119.19 (2019): 10916–10976. DOI: 10.1021/acs.chemrev.9b00202.

11. Gieshoff, J., M. Crocker et al. "Advanced Urea SCR Catalysts for Automotive Applications." *SAE 2001 World Congress*. SAE International, 2001. DOI: 10.4271/2001-01-0514.

12. Willi, R. et al. "Selective reduction of NO by NH3 over vanadia-based commercial catalyst: parametric sensitivity and kinetic modelling ." *Chemical Engineering Science* 51.11 (1996): 2897–2902.

13. Lepperhoff, G. and J. Schommers. "Verhalten von SCR-Katalysatoren im dieselmotorischen Abgas." *MTZ Motortechnische Zeitschrift* 49.1 (1988): 21.

14. Koebel, M., G. Madia and M. Elsener. "Selective catalytic reduction of NO and NO2 at low temperatures." *Catalysis Today* 73.3 (2002): 239–247. DOI: 10.1016/S0920-5861(02)00006-8.

15. *Emission project guide. MAN B&W Two-stroke Marine Engines*. Copenhagen SV, Denmark: MAN Energy Solutions, 2019.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Живлюк Григорий Евгеньевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *spb-engine-prof@mail.ru, kaf_dvs@gumrf.ru*

Петров Александр Павлович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *app.polab@inbox.ru, PetrovAP@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhivlyuk, Grigory E. —
PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg,
198035, Russian Federation
e-mail: *spb-engine-prof@mail.ru, kaf_dvs@gumrf.ru*

Petrov, Aleksandr P. —
PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipp
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg,
198035, Russian Federation
e-mail: *app.polab@inbox.ru, PetrovAP@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию: 16 марта 2026 г.
Received: March 16, 2026.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-501-514 **EDN XQQCVQ**

УДК 621.431.74

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА BS-STIRLING 5.0 ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В ДВИГАТЕЛЯХ СТИРЛИНГА

С. П. Столяров, Йе Маунг

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (СПбГМТУ), Санкт-Петербург, Россия

В статье представлена разработка программного комплекса BS-STIRLING 5.0, предназначенного для вычислительного моделирования рабочих процессов в двигателях Стирлинга. Новая версия, выполненная на основе методологической базы BS-STIRLING 4.2, включает ряд существенных усовершенствований, направленных на повышение физической детализации и точности расчетов при сохранении высокой вычислительной эффективности, характерной для методик второго уровня. Ключевым нововведением является переход от функциональной схемы представления двигателя к дискретизации внутреннего контура на 44 расчетных объема, что позволяет анализировать локальные термодинамические, гидродинамические и теплопередающие процессы в течение рабочего цикла. Дополнительные улучшения включают глобально связанную итерационную схему, явное моделирование теплообмена в цилиндрах, обновленные корреляции для колебательных потоков при низких числах Рейнольдса, модель теплопередачи с учетом температурных градиентов стенок, а также введение двух новых входных параметров: температуры регулирования по адиабате в горячем и холодном цилиндрах. Эти изменения существенно повышают точность расчета индикаторных диаграмм, тепловых потерь и эффективных параметров цикла. Валидация на экспериментальных данных 29 двигателей Стирлинга различных типов показала, что расхождение между расчетными и экспериментальными значениями эффективной мощности и КПД не превышает 5 %. Средняя ошибка в прогнозировании мощности снижена с 5,2 % до 4,9 %, а ошибка по КПД — с 13,6 % до 4,1 % по сравнению с версией 4.2. Программный комплекс обладает удобным графическим интерфейсом, низким временем расчета и широкими возможностями визуализации, что делает BS-STIRLING 5.0 эффективным инструментом для инженерных расчетов, научных исследований и образовательных целей.

Ключевые слова: двигатель Стирлинга, программный комплекс, моделирование рабочих процессов, расчетный объем, рабочее тело, термодинамический цикл, адиабатная модель цикла, гидравлические потери, теплопередача в рабочих объемах, валидация.

Для цитирования:
Столяров С. П. Разработка программного комплекса BS-STIRLING 5.0 для моделирова-ния рабочих процессов в двигателях Стирлинга / С. П. Столяров, Йе Маунг // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 3. С. 501–514. EDN XQQCVQ. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-501-514.

DEVELOPMENT OF THE BS-STIRLING 5.0 SOFTWARE PACKAGE FOR MODELLING OPERATING PROCESSES IN STIRLING ENGINES

S. P. Stolyarov, Ye Maung

St. Petersburg State Marine Technical University,
St. Petersburg, Russian Federation

The article presents the development of the BS-STIRLING 5.0 software package designed for computational modelling of operating processes in Stirling engines. The new version, developed on the basis of the methodological framework of BS-STIRLING 4.2, includes a number of significant improvements aimed at increasing physical detail and calculation accuracy while maintaining the high computational efficiency typical of second-order methods. The key innovation is the transition from a functional diagram representation of the engine to discretisation of the internal circuit into 44 control volumes, which makes it possible to analyse local thermodynamic, hydrodynamic, and heat-transfer processes during the operating cycle. Additional improvements include a globally coupled iterative scheme, explicit modelling of heat transfer in the cylinders, updated correlations for

oscillatory flows at low Reynolds numbers, a heat-transfer model taking into account wall temperature gradients, and the introduction of two new input parameters: adiabatic control temperatures in the hot and cold cylinders. These changes significantly improve the accuracy of calculating indicator diagrams, heat losses, and effective cycle parameters. Validation against experimental data from 29 Stirling engines of various types showed that the discrepancy between calculated and experimental values of effective power and efficiency does not exceed 5 %. Compared with version 4.2, the average error in power prediction was reduced from 5.2 % to 4.9 %, while the efficiency error decreased from 13.6 % to 4.1 %. The software package has a user-friendly graphical interface, short calculation time, and extensive visualisation capabilities, which makes BS-STIRLING 5.0 an effective tool for engineering calculations, scientific research, and educational purposes.

Keywords: Stirling engine, software package, modelling of operating processes, control volume, working fluid, thermodynamic cycle, adiabatic cycle model, hydraulic losses, heat transfer in working volumes, validation.

For citation:
Stolyarov, Sergey P. and Ye Maung. "Development of the BS-STIRLING 5.0 software package for modelling operating processes in Stirling engines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.3 (2026): 501–514. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-501-514.

Введение (Introduction

Моделирование рабочих процессов двигателей Стирлинга представляет собой сложную научную и инженерную задачу из-за сильно взаимосвязанного и нестационарного взаимодействия термодинамических, газодинамических и теплопередающих явлений [1, 2]. Точное моделирование необходимо для расчета мощности и КПД, оптимизации конструкции и повышения эффективности.

Вычислительные подходы к анализу двигателей Стирлинга можно разделить на несколько иерархических уровней. Самые ранние методики первого уровня, основанные на классической изотермической формулировке Шмидта [3], давали полезные теоретические представления, опираясь при этом на идеализированные допущения, ограничивающие их применимость к реальным двигателям [4].

Появление вычислительных систем позволило создать методики второго уровня, в которых идеализированные изотермические или адиабатные циклы корректируются с использованием эмпирических факторов для учета газодинамических потерь, несовершенной регенерации, утечек газа и внешних тепловых потерь. К числу известных представителей этого класса относятся работы Э. Р. Квейла [5], П. А. Риоса [6], В. Р. Мартини [7] и Р. Шоуреши [8], Х. Сниман и др. [9], М. Бабаэлахи и Х. Саяади [10], Г. Т. Уде и др. [11].

Развитие вычислительной мощности привело к появлению методик третьего уровня, в которых термодинамические и газодинамические процессы решаются одновременно с использованием систем уравнений сохранения. Важный вклад внесли Т. Финкельштейн [12, 13], И. Уриэли [14], А. Шок [15], Р. К. Тью [16], А. Дж. Орган [17] и другие исследователи [18, 19].

Начиная с 2000-х гг. подходы четвертого уровня, использующие полномасштабное трехмерное CAE-моделирование, позволили выполнить детальный анализ пространственных температурных полей, сложных структур потока и локальных эффектов теплопередачи [20–23]. Однако, несмотря на этот прогресс, остается фундаментальное противоречие. Методики второго уровня быстры и подходят для предварительного проектирования, но основаны на пространственно усредненных допущениях, которые не могут учитывать локальные гидродинамические и тепловые явления. Методики третьего и четвертого уровней обеспечивают более высокую физическую точность, но требуют значительных вычислительных ресурсов и длительного времени вычислений [4, 7, 20]. Эта проблема является более острой, поскольку современные двигатели Стирлинга работают при более высоких средних давлениях и имеют компактную геометрию, где локальные эффекты оказывают значительное влияние на производительность.

Кроме того, исследования, в том числе проведенные в Университете Калгари, показывают, что иерархия моделирования не всегда коррелирует с точностью прогнозирования: хорошо сформулированные функционально-структурные модели второго уровня могут превосходить некоторые методики более высокого уровня. Аналогичные выводы были сделаны Г. Ридером и К. Хупером [2], В. Р. Мартини [7] и Р. В. Дайсоном и др. [20].

Таким образом, существует явная необходимость в совершенствовании подходов к моделированию, которые сочетают вычислительную эффективность методик второго порядка с улучшенным физическим разрешением и точностью расчета для ключевых параметров, таких как температура, давление, мощность и КПД.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Ключевые улучшения, новые вводные параметры и функции в BSSTIRLING 5.0. Для решения указанных проблем были внесены улучшения в программный комплекс BS-STIRLING, который представляет собой один из наиболее передовых инструментов разработанных на основе методики второго порядка для анализа рабочих процессов двигателя Стирлинга.

Ядро программного комплекса BS-STIRLING было разработано в 1980–1990-х гг., после чего произошло значительное усовершенствование алгоритмов расчета теплопередачи, гидравлического сопротивления и тепловых потерь. Версия BS-STIRLING 4.2, последнее обновление которой состоялось 20 декабря 2002 г., была протестирована на более чем в 60 вариантах конструкции двигателей Стирлинга, различающихся рабочими параметрами, рабочими телами и конфигурациями теплообменников [24].

Среди программных комплексов, предназначенных для вычислительного анализа рабочих процессов в двигателях Стирлинга, BS-STIRLING 4.2 считается одним из наиболее зрелых и экспериментально подтвержденных инструментов, демонстрирующих высокую точность расчета эффективных мощности и КПД. Однако BS-STIRLING 4.2 в основном ориентирован на параметры интегрального цикла и усредненные характеристики элементов. Локальные гидродинамические теплообменные процессы внутри отдельных элементов двигателя представлены неявно, что является ограничивающим фактором анализа по мере развития конструкции двигателей в сторону более высоких уровней нагнетания и более сложных геометрических форм.

Несмотря на то, что методики третьего уровня обеспечивают большую физическую детализацию, их повышенная сложность не всегда гарантирует лучшую точность расчета. Таким образом, разработка BS-STIRLING 5.0 проводилась с использованием версии 4.2 в качестве методологической основы, при этом были внесены целенаправленные улучшения, направленные на преодоление ее основных ограничений.

Рассмотрим ключевые улучшения, новые вводные параметры и функции в BS-STIRLING 5.0.

Переходот функциональной схемы к дискретизации контрольных объемов. В BS-STIRLING 4.2 двигатель представлен пятью функциональными элементами, потери вводятся посредством эмпирических поправок. В отличие от этого в BS-STIRLING 5.0 используется дискретизация расчетных объемов всего внутреннего контура, который разделен на 44 расчетных объема, как показано на рис. 1. Каждый объем описывается локальными параметрами, которые изменяются со временем и взаимосвязаны со своими соседями, а глобальная согласованность обеспечивается уравнением сохранения массы:

$$M = \sum \frac{P_i V_i}{R T_i} = \text{const}. \quad (1)$$

Такой подход повышает физическую наглядность модели и позволяет проводить детальный анализ распределения температуры, давления, скорости и массового расхода на протяжении всего рабочего цикла.

Связанная итерационная схема для глобальной сходимости. BS-STIRLING 4.2 применяет итерации только к подпрограмме термодинамического расчета идеализированного цикла. Программный комплекс BS-STIRLING 5.0 распространяет итерационный подход на всю модель, обеспечивая одновременную сходимость термодинамических, гидродинамических процессов и процессов теплопередачи. Эта глобально связанная схема повышает численную устойчивость и обеспечивает согласованность решений по массе и энергии во всех расчетных объемах.

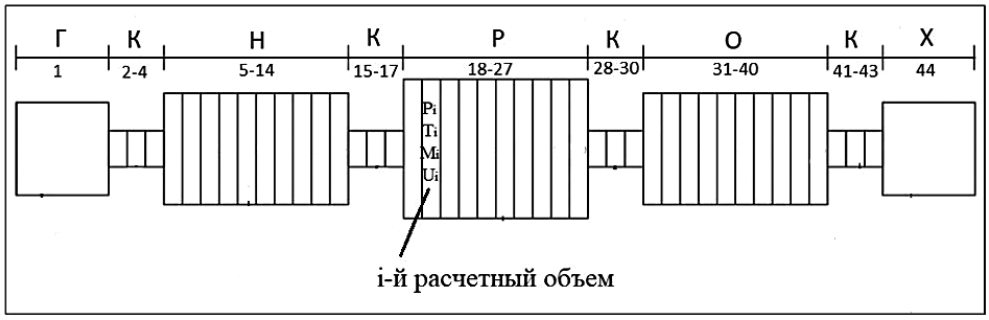


Рис. 1. Принципиальная схема дискретизации двигателя для детального анализа реальных рабочих процессов в элементах внутреннего контура двигателя: Г — горячая полость; Н — нагреватель; Р — регенератор; О — охладитель; Х — холодная полость; К — соединенный канал

Fig. 1. Schematic diagram of engine discretization for detailed analysis of actual operating processes in the elements of the engine internal circuit: Г — hot space; Н — heater; Р — regenerator; О — cooler; Х — cold space; К — connecting channel

Явное моделирование теплопередачи в цилиндрах. При термодинамическом расчете идеализированного рабочего цикла в BS-STIRLING 4.2 процесс теплообмена между рабочим телом и стенкой цилиндрах игнорируется, а BS-STIRLING 5.0 учитывается. Это усовершенствование повышает физическую реалистичность модели адиабатного цикла и улучшает расчет индикаторных диаграмм и тепловых потерь.

Базовое уравнение без учета процесса теплообмена, используемое в версии 4.2:

$$\frac{\Delta T}{T_1+\Delta T/2}=A=\frac{\Delta P}{(P_1+\Delta P/2)}\left(1-\frac{1}{k}\frac{T_1+\Delta T/2}{T_{\text{вх}}}\right)+\frac{\Delta V}{(V_1+\Delta V/2)}\left(\frac{T_{\text{вх}}-T_1-\Delta T/2}{T_{\text{вх}}}\right). \quad (2)$$

Базовое уравнение [25], учитывающее процесс теплообмена, используемое в версии 5.0:

$$\frac{\Delta T}{T_1+\Delta T/2}=A=\frac{\Delta P}{(P_1+\Delta P/2)}\left(1-\frac{1}{k}\frac{T_1+\Delta T/2}{T_{\text{вх}}}\right)+\frac{\Delta V}{(V_1+\Delta V/2)}\left(\frac{T_{\text{вх}}-T_1-\Delta T/2}{T_{\text{вх}}}\right);$$

$$-\frac{\alpha\cdot F_{\text{пт}}\cdot\Delta\varphi}{6n\cdot T_{\text{вх}}}\frac{k-1}{k}\left[\frac{(T_1+\Delta T/2)(T_1+\Delta T/2-T_{\text{w}})-\Delta T^2/4}{P_1V_1+\Delta P\cdot V_1/2+\Delta V\cdot P_1/2}\right], \quad (3)$$

где α — средний коэффициент теплопередачи; $F_{\text{ПТ}}$ — площадь поверхности теплообмена; T, P, V — температура, давление, объем газа; T_{w} — средняя температура стенки элемента внутреннего контура; $T_{\text{вх}}$ — температура входящего рабочего тела; k — показатель адиабаты; n — частота вращения вала; $\Delta\varphi$ — расчетный интервал.

В BS-STIRLING 5.0 подпрограмма термодинамического расчета идеализированного рабочего цикла выполняется с использованием адиабатной модели. Несмотря на то, полная модель впоследствии использует детальную дискретизацию расчетного объема, эта подпрограмма представляет двигатель с помощью пяти сосредоточенных элементов: горячей полости, нагревателя, регенератора, охладителя и холодной полости. Полученные значения давления и температуры в течение цикла для пяти элементов служат начальными условиями для дискретизированной модели расчетных объемов, используемой в основном итерационном моделировании.

В этом случае на первой итерации теплопередача в цилиндрах пренебрегается, поскольку коэффициенты теплопередачи еще неизвестны, поэтому они изначально устанавливаются равными нулю ($\alpha_{\text{г}}=\alpha_{\text{х}}=0$). После первого цикла коэффициенты обновляются и включаются в последующие итерации. Изменение давления между этапами расчета получается из соотношения баланса массы, а изотермический объемный фактор используется для связи термодинамических состояний нагревателя, регенератора и охладителя.

Улучшенное моделирование колебательных потоков при низком числе Рейнольдса Re. Реальные двигатели Стирлинга работают в условиях колебательного потока, где Re дважды за цикл пересекает нулевое значение. BS-STIRLING 4.2 не учитывает этот режим, тогда как BS-STIRLING 5.0 вводит специализированные корреляции [26, 27] для потоков с низким Re, что позволяет более точно рассчитывать гидравлические потери. Это улучшение имеет решающее значение для двигателей с узкими каналами, высокой частотой или высоким средним давлением.

Усовершенствованная модель теплопередачи с градиентами температуры стенок. BS-STIRLING 4.2 предполагает постоянную температуру стенок. BS-STIRLING 5.0 включает градиенты температуры стенок теплообменника и модель теплопередачи, зависящую от давления. Это позволяет получать более точные результаты расчета эффективности регенератора и потерь в теплообменнике:

$$T_2(\tau) = \frac{A}{A-B}T_{w1} + \left(T_1 - \frac{A}{A-B}T_{w1}\right)e^{-(A-B)\tau} + \Delta T_w \frac{v_1}{\Delta x}\frac{A\tau^2}{2}; \quad (4)$$

$$A = \frac{4\mathrm{Nu}}{d_г^2}a; \quad (5)$$

$$B = \frac{k-1}{k}\frac{\Delta P/\Delta\tau}{P_1 + \Delta P/2}, \quad (6)$$

где a — температуропроводность; $d_г$ — гидравлический диаметр; Nu — число Нуссельта; v — скорость газа; Δx и $\Delta\tau$ — соответственно расстояние и время прохождения рабочего тела.

Принципиальная схема расчета теплопередачи между рабочим телом и стенками элементов внутреннего контура двигателя показана на рис. 2.

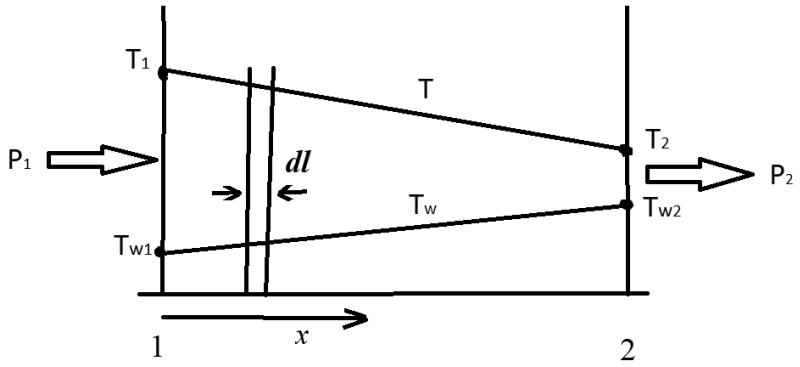


Рис. 2. Принципиальная схема расчета теплопередачи между рабочим телом и стенками элементов внутреннего контура двигателя

Fig. 2. Schematic diagram for calculating heat transfer between the working fluid and the walls of the engine internal circuit elements

Введение двух новых входных параметров для адиабатической регулировки температуры. В BS-STIRLING 5.0 ключевым улучшением является введение двух дополнительных входных параметров — температуры регулирования по адиабате в горячем и холодном цилиндрах ($\Delta T_г$ и $\Delta T_х$).

Несмотря на то, что адиабатная модель значительно точнее изотермической, ее применение требует более сложного определения мгновенных температур в горячем и холодном цилиндрах ($\Delta T_г$ и $\Delta T_х$). Эти температуры существенно влияют на расчет индикаторных процессов, величину тепловых потерь, адиабатные потери и, в меньшей степени, гидравлические потери. Поэтому их правильный расчет имеет решающее значение для надежного расчета эффективной мощности и КПД двигателя. В рамках адиабатной модели после определения давления температуры в горячем и холодном цилиндрах рассчитываются с использованием следующих выражений:

$$T_г = (T_н + \Delta T_г)\left(\frac{P}{P_{max}}\right)^{\frac{k-1}{k}}; \quad (7)$$

$$T_х = (T_о - \Delta T_х)\left(\frac{P}{P_{min}}\right)^{\frac{k-1}{k}}; \quad (8)$$

$$T_н = T_{нw} - \Delta T_н; \quad (9)$$

$$T_о = T_{оw} + \Delta T_о, \quad (10)$$

где $T_н$ и $T_о$ — температуры нагревателя и охладителя; P_{min} и P_{max} — минимальное и максимальное давления; $T_{нw}$ и $T_{оw}$ — температуры стенок нагревателя и охладителя; $\Delta T_н$ и $\Delta T_о$ — средние за цикл температурные напоры нагревателя и охладителя.

Данное улучшение значительно повышает точность моделирования цикла, особенно в условиях высокого давления или высокой температуры.

Улучшенная термодинамическая инициализация с помощью обновленной модели адиабатного цикла. Модуль термодинамической инициализации включает:

– обновленную обработку теплопередачи в цилиндрах;

– итеративную коррекцию начальных давлений и температур;

– улучшенное обеспечение баланса массы.

Это гарантирует, что модель расчетного объема начинает работу с физически согласованных начальных условий.

Результаты (Results)

Функции BS-STIRLING 5.0. Разработанный программный комплекс реализован на языке Python и имеет удобный графический интерфейс для подготовки входных данных, управления вычислениями и визуализации результатов. Программа генерирует как двумерные, так и трехмерные графики, включая индикаторные диаграммы, термодинамические траектории и пространственное распределение термофизических параметров по расчетным объемам.

Табличные данные индикаторных, термодинамических, гидродинамических параметров и параметров теплопередачи расчетных объемов могут быть экспортированы в Microsoft Excel, а входные параметры сохраняются в формате (.ssy) для последующих расчетов. Время вычислений программного комплекса остается низким: на типичном персональном компьютере полный итерационный расчет рабочего цикла занимает приблизительно одну минуту. Это делает BS-STIRLING 5.0 удобным для исследовательских и проектных расчетов без увеличения требований к ресурсам.

Программный комплекс обеспечивает выполнение широкого спектра расчетных функций. Примеры реализации отдельных функций программного комплекса представлены на рис. 3–7. На рис. 3 представлен графический интерфейс пользователя программного комплекса BS-STIRLING 5.0 на примере двигателя GPU-3, обеспечивающий ввод исходных данных и управление расчетным процессом. Исходные данные сгруппированы по конструктивным элементам и режимным параметрам. На рис. 4 показаны индикаторная диаграмма и двумерное распределение температуры по элементам внутреннего контура двигателя, что позволяет анализировать как интегральные характеристики цикла, так и распределение температуры по элементам конструкции. На рис. 5 приведено трехмерное распределение температуры в расчетных объемах двигателя GPU-3, отражающее особенности температурного поля во внутреннем контуре.

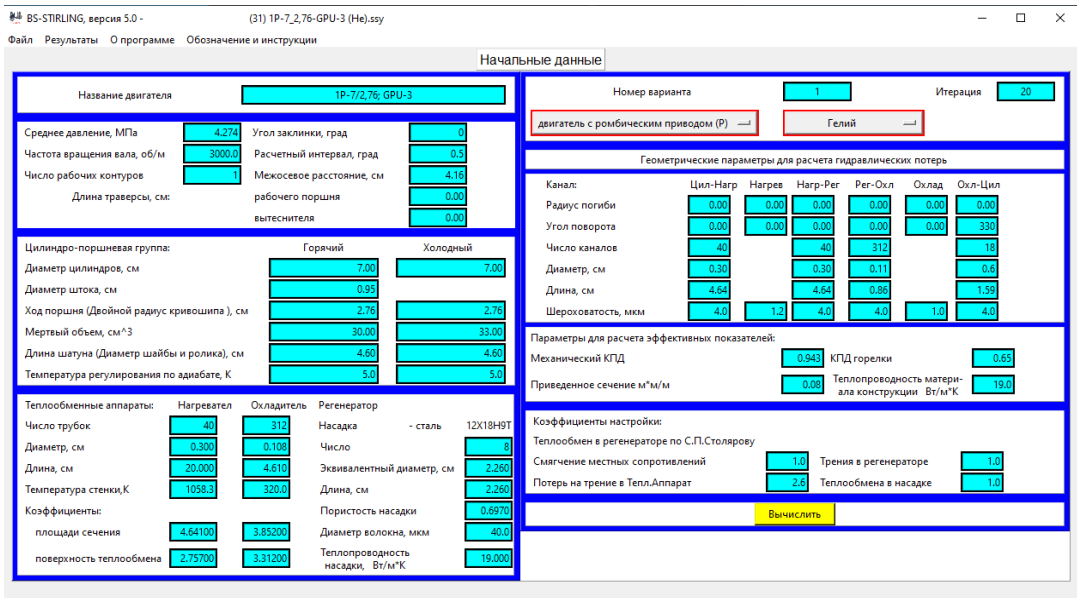


Рис. 3. Графический интерфейс пользователя (GUI) разработанного программного комплекса BS-STIRLING 5.0 с начальными данными для двигателя Стирлинга GPU-3

Fig. 3. Graphical user interface (GUI) of the developed BS-STIRLING 5.0 software package with initial data for the GPU-3 Stirling engine

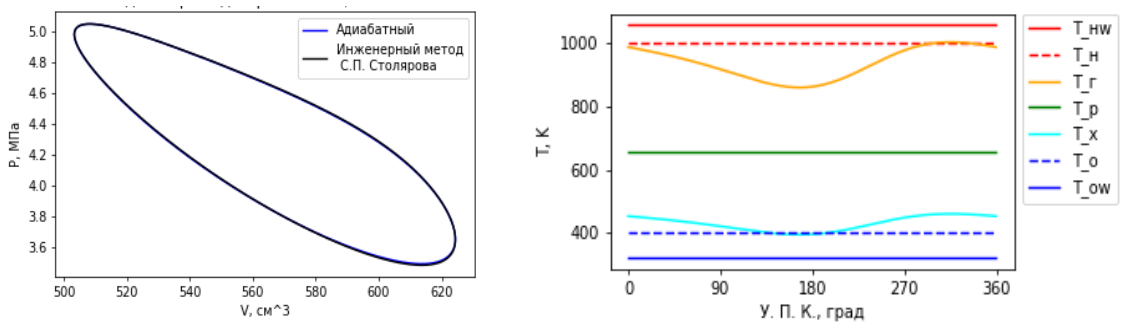


Рис. 4. Индикаторная диаграмма и двумерное распределение температуры двигателя GPU-3, рассчитанные с использованием BSTIRLING 5.0 (инженерный метод С. П. Столярова, представленный на 20-й ISEC [28] и [29])

Fig. 4. Indicator diagram and two-dimensional temperature distribution of the GPU-3 engine calculated using BS-STIRLING 5.0; S. P. Stolyarov's engineering method was presented at the 20th ISEC [28] and in [29]

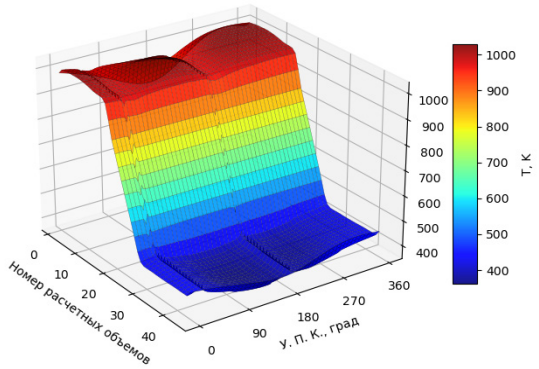


Рис. 5. Трехмерное распределение температуры в расчетных объемах двигателя GPU-3, рассчитанное с помощью BSTIRLING 5.0

Fig. 5. Three-dimensional temperature distribution in the computational volumes of the GPU-3 engine calculated using BS-STIRLING 5.0

Результаты расчетов рабочего цикла включают параметры мощности и эффективности, потери теплоты, температурные напоры в нагревателе и охладителе, характерные величины рабочего давления, тепловые потоки в нагревателе и охладителе, а также потери теплоты в регенераторе (рис. 6).

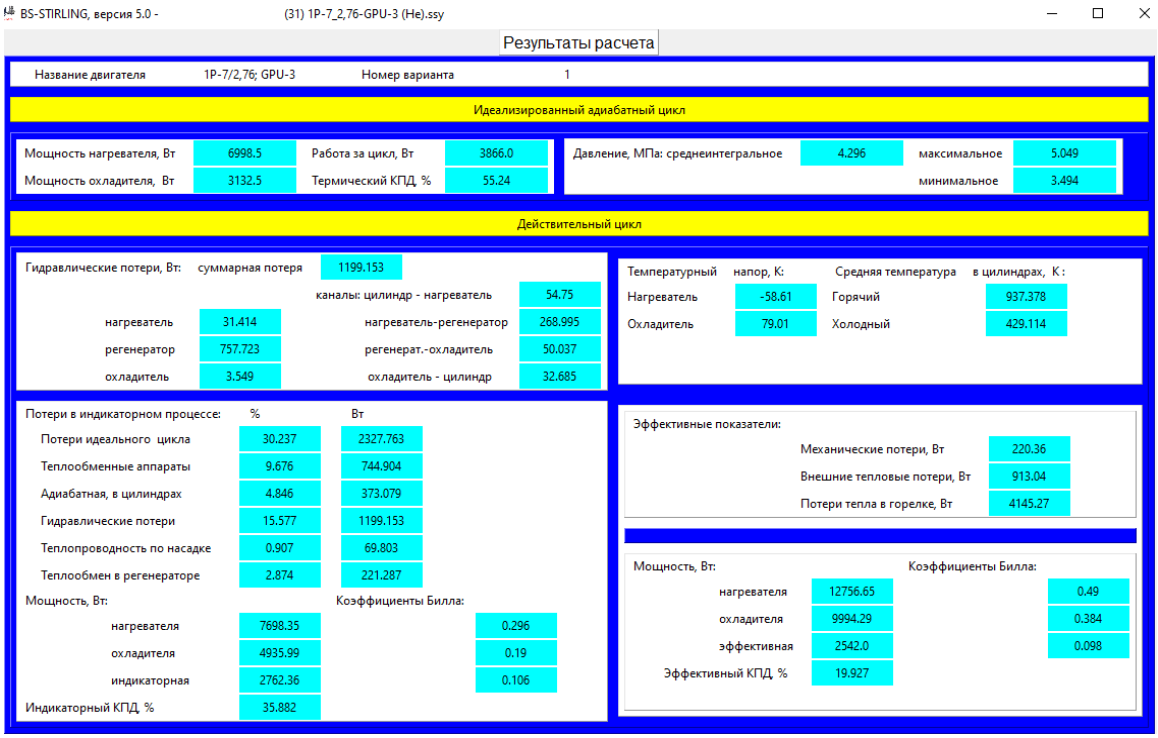


Рис. 6. Результаты расчета для двигателя Стирлинга GPU-3, рассчитанные с использованием BSTIRLING 5.0
Fig. 6. Calculation results for the GPU-3 Stirling engine, calculated using BSTIRLING 5.0

Для детального изучения процессов в отдельных расчетных элементах предусмотрена возможность вывода в файл параметров рабочего тела, критериальных чисел для потока рабочего тела, основных параметров теплофизических процессов, в том числе коэффициенты трения в потоке и местных сопротивлений, рис. 7. Эти данные позволяют выявлять зоны повышенных гидравлических и тепловых потерь и анализировать локальные параметры рабочего процесса в расчетных объемах двигателя GPU-3 за один цикл, рассчитанный с помощью STIRLING 5.0.

Среднее значение гидродинамических параметров и параметров теплопередачи в расчетных объемах за один цикл

№. объем	ρ, кг/м^3	G, г/с	U, м/с	μ, мкПа.с	Re	ζ_f	ζ_м	суммарнк	k, Вт/(м·К)	Nu	Вт/(м^2·К	ΔP, МПа	P, МПа	ΔT, K	T, K	Tw, K
1	2.198	26.301	10.056	43.115	32882.8	0.027	0.000	0.027	0.370	60.065	316.564	0.00000	4.296	-15.092	937.378	952.470
2	2.198	26.667	43.420	43.115	6587.2	0.062	0.510	0.572	0.358	18.376	2187.287	0.00223	4.296	-30.865	985.103	1015.968
3	2.198	26.695	43.467	43.115	6594.4	0.063	0.000	0.063	0.358	18.392	2189.194	0.00091	4.295	-47.832	989.302	1037.134
4	2.198	26.726	44.323	43.115	325570.6	0.034	0.615	0.649	0.366	336.502	1503.765	0.00232	4.295	-59.555	993.454	1053.008
5	2.069	26.958	27.716	45.057	322959.9	0.078	0.000	0.078	0.375	330.206	771.284	0.00037	4.295	-63.094	995.206	1058.300
6	2.069	27.490	10.408	45.057	1394.9	0.177	0.000	0.177	0.375	5.855	731.091	0.00008	4.295	-60.763	997.537	1058.300
7	2.069	28.140	10.658	45.057	1427.8	0.234	0.000	0.234	0.375	5.950	742.932	0.00009	4.295	-56.269	1002.031	1058.300
8	2.069	28.887	10.946	45.057	1465.7	0.192	0.000	0.192	0.375	6.049	755.306	0.00009	4.295	-53.588	1004.712	1058.300
9	2.069	29.717	11.268	45.057	1507.8	0.131	0.000	0.131	0.375	6.152	768.212	0.00009	4.295	-52.509	1005.791	1058.300
10	2.069	30.618	11.619	45.057	1553.6	0.398	0.000	0.398	0.375	6.256	781.185	0.00010	4.295	-52.905	1005.395	1058.300
11	2.069	31.583	11.994	45.057	1602.5	0.392	0.000	0.392	0.375	6.360	794.149	0.00010	4.295	-54.727	1003.573	1058.300
12	2.069	32.604	12.392	45.057	1654.3	0.150	0.000	0.150	0.375	6.528	815.179	0.00011	4.295	-58.056	1000.244	1058.300
13	2.069	33.678	12.810	45.057	1708.8	0.149	0.000	0.149	0.375	6.757	843.680	0.00012	4.295	-63.054	995.246	1058.300
14	2.069	34.800	37.772	45.057	417419.4	0.067	0.000	0.067	0.375	404.821	930.005	0.00069	4.294	-65.679	992.621	1058.300
15	2.069	35.476	62.701	45.057	420740.0	0.031	0.418	0.449	0.375	412.366	1872.110	0.00332	4.294	-44.096	991.132	1035.228
16	2.069	35.671	63.054	45.057	8400.1	0.049	0.000	0.049	0.375	22.003	2747.399	0.00172	4.294	-1.664	987.420	989.084

Сохранить в формате Excel

Рис. 7. Среднее значение параметров гидродинамики и теплопередачи
Fig. 7. Mean values of hydrodynamic and heat-transfer parameters

Программный комплекс обеспечивает как расчет интегральных характеристик цикла, так и анализ локальных термодинамических, гидродинамических процессов и процессов теплопередачи во внутреннем контуре двигателя.

Интерфейс программного комплекса позволяет дополнить его программными алгоритмами более высокого уровня и организовать серии расчетов по различным схемам, например для поиска экстремумов отдельных параметров, формирования таблиц для построения графиков и диаграмм, решения оптимизационных задач.

Валидация программного комплекса BS-STIRLING 5.0 на основе опубликованных экспериментальных данных. При валидации численных моделей двигателей Стирлинга часто используются экспериментальные данные, полученные только на одном или двух образцах. Такой подход распространен, но по своей сути ограничен, поскольку ограничивает область применения выводов до узкого диапазона рабочих параметров и конструктивных решений.

Более объективная и надежная оценка адекватности модели достигается путем сравнения расчетных результатов с широким спектром опубликованных экспериментальных данных, охватывающих различные типы двигателей, условия эксплуатации и уровни производительности. Такой подход позволяет дать более всестороннюю оценку надежности и универсальности используемого метода расчета.

В данном исследовании BS-STIRLING 5.0 был валидирован с использованием опубликованных экспериментальных данных для 29 двигателей Стирлинга, представленных в открытой научной литературе. Основные технические характеристики 15 из 29 двигателей, использованных для валидации, приведены в табл. 1. Рассматриваемые двигатели охватывают широкий диапазон рабочих условий: эффективную мощность от 53 Вт до 134 кВт, среднее давление от 0,4 до 20 МПа и частоту вращения от 500 до 4000 об/мин. Выборка включает двигатели, работающие на воздухе (в-х), водороде (H2) и гелии (He), охватывающие наиболее распространенные рабочие тела в области практического применения двигателей Стирлинга. С точки зрения кинематической схемы набор для валидации включает 11 двигателей α-типа (А), три двигателя β-типа (В), три двигателя γ-типа (Г), пять двигателей двойного действия с кривошипно-шатунным механизмом (К), три двигателя двойного действия с наклонной шайбой (Н) и четыре двигателя с ромбическим приводом (Р), т. е. всего 29 двигателей.

Таблица 1

Основные технические характеристики 15 из 29 двигателей, использованных для валидации

Table 1

Main technical characteristics of 15 of the 29 engines used for validation

Двигатель	Производитель/ Разработчик	КС	i	$D_г$, см	$S_г$, см	$D_х$, см	$S_х$, см	Ф	РТ	$P_{ср}$, бар	T_{hw}, К	T_{ow}, К	n, мин$^{-1}$
2R70	Research Institute of Shipbuilding, г. Шанхай	А	1	7	5	7	5	90	He	100	973	313	2000
NS03T	Toshiba, Япония	А	1	8,2	3,6	8,2	3,2	110	He	45	973	323	750
V-160F	United Stirling AB, Швеция	А	1	6,8	4,4	6,8	4,4	90	He	150	993	313	2400
V-160/ Solo-161	SOLO Kleinmotoren, Германия	А	1	6,8	4,4	6,8	4,4	90	He	150	993	320	1500
MP 1002C	Philips, Нидерланды	В	1	5,6	2,5	5,6	2,7	70	В-х	8,28	1073	313	1800
4-215D.A		Н	4	7,3	5,2	7,3	5,2	90	H2	200	1023	343	1350
Sunpower ST-5	Sunpower Inc., США	В	1	30	10	30	10	65	В-х	4	925	315	605

Таблица 1
(Окончание)

SM-1	Technical University of Denmark, г. Лингби	B	1	10,5	5,1	9,5	6	70	He	76,7	953	313	1050
SM-3		K	4	14	7,4	14	7,4	90	He	43	963	323	1015
ST 05 G	D. Viebach, Германия	Г	1	9,6	7,5	8,5	7,5	90	В-х	10	923	350	500
4L23	General Motors Co., США	K	4	10,1	4,6	10,1	4,6	90	He	103,4	1033	330	2000
GPU-3		P	1	7	2,7	7	2,7	0	He	42,74	1058	320	3000
Mod I	Mechanical Technology Inc. + NASA, США	K	4	6,8	3,4	6,8	3,4	90	H2	150	993	343	4000
Mod II		K	4	7,3	3	7,3	3	90	H2	150	1093	343	4000
KS15D	DaimlerBenz, Германия	H	4	5,6	2,8	5,6	2,8	90	He	175	1043	333	1500

КС — кинематическая схема; А — α-схема; В — β-схема; Г — γ-схема; К — двигатель двойного действия с КШМ; Н — двигатель двойного действия с наклонной шайбы; Р — двигатель с ромбическим приводом; i — число рабочих контуров; $D_г$, $S_г$ — соответственно диаметр и ход горячей полости; $D_х$, $S_х$ — соответственно диаметр и ход холодной полости; Ф — фазовый угол, РТ — рабочее тело, n — частота вращения вала.

Результаты сравнения расчетных данных, полученных с использованием программных комплексов BS-STIRLING 4.2 и BS-STIRLING 5.0, с экспериментальными данными представлены в табл. 2. Сравнительный анализ расхождений по эффективной мощности и эффективному КПД приведен на рис. 8.

Установлено, что при использовании BS-STIRLING 5.0 расхождение между расчетными и экспериментальными значениями эффективной мощности и КПД не превышает 5 %. Для набора из 29 двигателей среднее расхождение в расчете эффективной мощности (Ne) уменьшается с 5,2 % до 4,9 %, а эффективной КПД (η) — с 13,6 % до 4,1 % по сравнению с BS-STIRLING 4.2.

Таблица 2

Сравнение результатов версий BS-STIRLING с экспериментальными данными

Table 2

Comparison of the results obtained using different BS-STIRLING versions with experimental data

Двигатель	Версия 4.2		Версия 5.0		Экспериментальный		Версия 4.2		Версия 5.0	
	Ne, Вт	η, %	Ne, Вт	η, %	Ne, Вт	η, %	δNe, %	δη, %	δNe, %	δη, %
2R70	10434	32,3	11035	30,3	10700	31	2,5	4,2	3,1	2,2
NS03T	1567	39,2	1626	36,0	1600	–	2,1	–	1,6	–
V-160F	14627	29,0	15440	30,2	15000	–	2,5	–	2,9	–
V-160/Solo-161	10995	28,0	11216	29,6	11000	30,0	0,0	6,7	2,0	1,3
4-215D.A	60794	33,0	60455	31,8	60507	–	0,5	–	0,1	–
MP 1002C	317	22,7	243	19,1	318	–	0,3	–	23,4	–
Sunpower ST-5	2655	19,4	2643	19,5	3300	19,5	19,5	0,5	19,9	0,1
SM-1	7266	31,8	7183	30,8	7070	30,0	2,8	6,0	1,6	2,7
SM-3	36050	35,3	40900	33,1	41000	–	12,1	–	0,2	–
ST 05 G	603	30,7	491	22,9	500	–	20,6	–	1,8	–
4L23	95683	30,1	91967	29,0	90379	31,6	5,9	4,7	1,8	8,1
GPU-3	2497	27,8	2542	19,9	2514	18,8	0,7	47,9	1,1	6,0

Таблица 2
(Окончание)

Mod I	50318	28,8	56101	30,1	54400	34,6	7,5	16,8	3,1	13,0
Mod II	63388	36,5	64253	32,3	62300	31,7	1,7	15,1	3,1	1,9
KS15D	14892	37,4	15760	37,3	15000	37,0	0,7	1,1	5,1	0,7

Ne — эффективная мощность; η — эффективный КПД; δNe и δη — расхождение в расчете эффективных мощности и КПД соответственно.

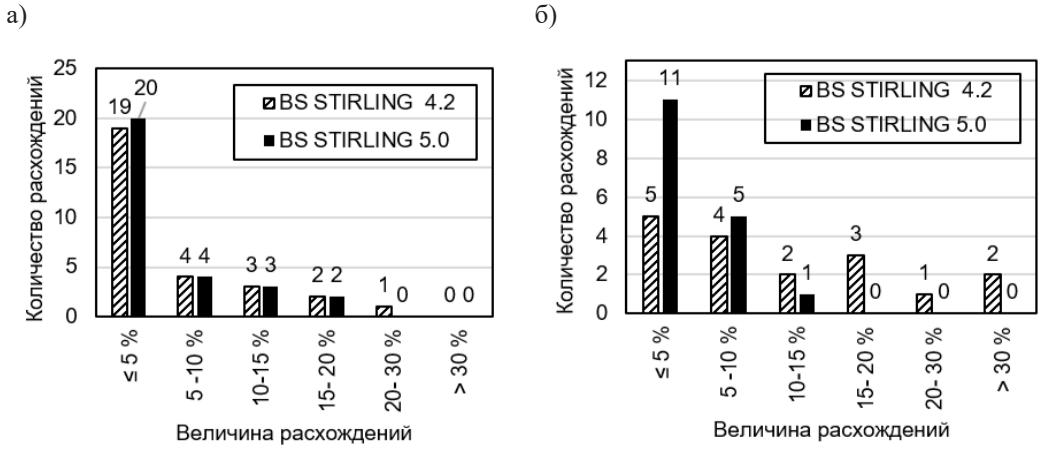


Рис. 8. Расхождение результатов расчета версий BS-STIRLING по сравнению с экспериментальными данными по следующим параметрам: *а* — эффективная мощность; *б* — эффективный КПД
Fig. 8. Discrepancy between the calculation results obtained using different BS-STIRLING versions and experimental data for the following parameters: a — brake power; b — brake efficiency

Результаты, представленные в табл. 2 и на рис. 8, показывают, что методологические улучшения, реализованные в BS-STIRLING 5.0, приводят к повышению точности и надежности модели, подтверждая возможность использования разработанного программного комплекса для анализа характеристик двигателей Стирлинга в широком диапазоне конструкций и рабочих параметров.

Выводы (Symmary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Разработанный программный комплекс BS-STIRLING 5.0 представляет собой гибридный подход к моделированию, который сочетает вычислительную эффективность, характерную для инженерных методик второго уровня, с повышенной точностью расчета и улучшенным физическим разрешением, характерными для методик расчетных объемов уровня. Такой гибридный подход ранее не применялся при моделировании рабочих процессов двигателя Стирлинга.

2. Ключевые усовершенствования включают полную дискретизацию внутреннего контура двигателя по расчетному объему, глобально связанную итеративную схему решения, явное моделирование теплопередачи в цилиндрах и улучшенную обработку осциллирующих потоков с низким Re, добавление двух новых параметров — температур регулирования по адиабате.

3. Валидация по опубликованным экспериментальным данным для 29 двигателей Стирлинга показывает, что новая версия снижает среднюю погрешность в расчете мощности с 5,2 % до 4,9 % и среднюю погрешность в расчете КПД с 13,6 % до 4,1 %. Максимальные отклонения между расчетными и экспериментальными значениями не превышают 5 % как для мощности, так и для КПД.

4. Полученные результаты подтверждают, что BS-STIRLING 5.0 представляет собой надежный и вычислительно эффективный программный комплекс для инженерного анализа, оптимизации проектирования и образовательных целей, связанных с двигателями Стирлинга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tew R. C.* Overview of heat transfer and fluid flow problem areas encountered in Stirling engine modeling / R. C. Tew. Cleveland, Ohio: NASA Technical Memorandum, 1988. — 23 p.

2. *Ридер Г.* Двигатели Стирлинга / Г. Ридер, Ч. Хупер. М.: Энергия, 1986. 464 с.

3. *Finkelstein T.* Air Engines. The History, Science and Reality of the Perfect Engine / T. Finkelstein, A. J. Organ. New York: ASME Press, 2001. — 288 p.

4. *Chen N. C. J.* A review of Stirling engine Mathematical Models / N. C. J. Chen, F. P. Griffin. Virginia: Springfield, 1983. — 43 p.

5. *Qvale E. R.* An Analytical Model of Stirling-Type Engines: PhD diss / E. R. Qvale. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1967. — 96 p.

6. *Rios P. A.* An Analytical and Experimental Investigation of the Stirling Cycle. Ph.D. dissertation / P. A. Rios. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1969. — 179 p.

7. *Martini W. R.* Stirling Engine Design Manual. NASA CR-168088 / W. R. Martini. NASA, 1983. — 410 p.

8. *Shoureshi R.* Analysis and Design of Stirling Engines for Waste-Recovery: PhD diss. / R. Shoureshi. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1981. — 361 p.

9. *Snyman H.* Design Analysis Methods for Stirling Engines / H. Snyman, T. M. Harms., J. M. Strauss // Journal of Energy in Southern Africa. — Vol. 19. — No. 3, Cape Town, 2008. — Pp. 4–19.

10. *Mojtaba Babaelahi*. Modified psvl: a second order model for thermal simulation of stirling engines based on convective – polytropic heat transfer of working spaces / Mojtaba Babaelahi, Hoseyn Sayyaadi // Applied Thermal Engineering, 85:340–355, 2015. — Pp. 340–355.

11. *Godfrey T Udeh*. A new non-ideal second order thermal model with additional loss effects for simulating beta Stirling engines / Godfrey T Udeh, Stavros Michailos, Derek Ingham, Kevin J Hughes, Lin Ma, Mohammed Pourkashanian // Energy Conversion and Management, 206:112493, 2020. — 22 p.

12. *Finkelstein T.* Thermodynamic Analysis of Stirling Engines / T. Finkelstein // Journal of Spacecraft & Rockets. 1967. — Vol. 4. Is. 9. — Pp. 1184–1189.

13. *Finkelstein T.* Computer Analysis of Stirling Engines / T. Finkelstein // Advances in Cryogenic Engineering. — 1975. — Vol. 20. — Pp. 269–282.

14. *Urieli I.* A Computer Simulation of Stirling Cycle Machines: PhD diss./ I. Urieli. South Africa, Witwatersrand: University of the Witwatersrand, 1977. — 313 p.

15. *Schock A.* Nodal Analysis of Stirling Cycle Devices / A. Schock // Proceedings of the 13th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, San Diego, California, August 20-25 San Diego: Society of Automotive Engineers, 1978. — Pp. 1771–1779.

16. *Tew R. C.* Computer Program for Stirling Engine Performance Calculations. NASA/TM-82960 / R. C. Tew. National Aeronautics and Space Administration, 1983. — 129 p.

17. *Organ A. J.* Thermodynamics and Gas Dynamics of the Stirling Cycle Machine / A. J. Organ. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. — 415 p.

18. *Andrew Peter Robson*. Third Order Analysis of a Low Temperature Differential Ringbom-Stirling Engine / Andrew Peter Robson // Ph.D. dissertation. Napier University, Edinburgh, Scotland, 2007. — 257 p.

19. *Hao Qiu*. A third-order numerical model and transient characterization of a β-type Stirling engine / Hao Qiu, Kai Wang, Peifeng Yu, Mingjiang Ni, Gang Xiao // Energy. — 2021. Vol. 222. — 18 p.

20. *Dyson R. W.* Review of Computational Stirling Analysis Methods. NASA/TM-2004-213300 / R. W. Dyson, S. D. Wilson, R. C. Tew. Cleveland, Ohio: Glenn Research Center, 2004. — 28 p.

21. *Kuban L*. A 3D-CFD study of a γ-type Stirling engine / L Kuban, J. Stempka, A. Tyliszczak // Energy — 2019. — Vol. 169, 142–159. — Pp.142–159.

22. *George-Rafael Domenikos*. Parametric Numerical Analysis of β-Type Stirling Engine / George-Rafael Domenikos, Irene Koronaki,Theodoros Papingiotis, Panagiotis Bitsikas // Energies. — 2023. — 16(18). — 6518 — 2023. — 14 p.

23. *Santiago Laín*. CFD Simulation of Stirling Engines: A Review / Santiago Laín, Valentina Villamil, Juan R. Vidal // Processes. — 2024. — 12(11). — 2360. — 26 p.

24. *Столяров С. П.* Опыт выполнения расчетно-экспериментальных исследований машин Стирлинга с использованием программного комплекса «BS-STIRLIN» / С. П. Столяров, А. С. Столяров // Актуальные проблемы развития поршневых ДВС: материалы межотраслевой научно-технической конференции СПб.: Издательский центр СПбГМТУ, 2008. — С. 40–43.

25. *Столяров С. П.* Базовое уравнение математической модели элемента внутреннего контура двигателя Стирлинга с учетом процесса теплообмена / С. П. Столяров, М. Йе, А. С. Столяров // Двигателестроение. — 2024. — № 2(296). — С. 69–74. EDN AQUIAG.

26. *Столяров С. П.* Математическая формализация метода определения коэффициентов гидравлического сопротивления для внезапного расширения и сужения потока рабочего тела / С. П. Столяров, Йе Маунг // Естественные и технические науки. — 2026. — № 1(212). — С. 223–231. EDN XJLBUI. DOI: 10.25633/ETN.2026.01.19.

27. *Столяров С. П.* Модель сдвоенных гидравлических сопротивлений во внутреннем контуре двигателя Стирлинга / С. П. Столяров, Йе Маунг // Естественные и технические науки. — 2026. — № 1(212). — С. 232–239. EDN IXWPIE. DOI: 10.25633/ETN.2026.01.20.

28. *Stolyarov S. P.* New analytical method for Stirling engine thermodynamic cycle calculation using simplified adiabatic model / S. P. Stolyarov, A. S. Stolyarov, Ye Maung // Proceedings of the 20th International Stirling Engine Conference Neaples: Cnr Edizioni. — 2024. — Pp. 219–230. DOI: 10.48221/ISEC20-2024.

29. *Столяров С. П.* Метод расчета давления в цикле двигателя Стирлинга по упрощенной адиабатной методике / С. П. Столяров, А. С. Столяров, Йе Маунг // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2022. — № 68–69. — С. 122–129. EDN FGABIW.

REFERENCES

1. Tew, R. C. *Overview of heat transfer and fluid flow problem areas encountered in Stirling engine modeling.* Cleveland, Ohio: NASA Technical Memorandum, 1988: 23.

2. Rider, G. and Ch. Khuper. *Dvigateli Stirlinga.* M.: Energiya, 1986: 464.

3. Finkelstein, T. and A. J. Organ. *Air Engines. The History, Science and Reality of the Perfect Engine.* New York: ASME Press, 2001: 288.

4. Chen, N. C. J. and F. P. Griffin. *A review of Stirling engine Mathematical Models.* Virginia: Springfield, 1983: 43.

5. Qvale, E. R. *An Analytical Model of Stirling-Type Engines. Ph.D. dissertation.* Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1967: 96.

6. Rios, P. A. *An Analytical and Experimental Investigation of the Stirling Cycle. Ph.D. dissertation.* Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1969: 179.

7. Martini, W. R. *Stirling Engine Design Manual. NASA CR-168088.* NASA, 1983: 410.

8. Shoureshi, R. Analysis and Design of Stirling Engines for Waste-Recovery. Grand PhD diss. Massachusetts, 1981.

9. Snyman H., Harms T.M., Strauss J.M. *Design Analysis Methods for Stirling Engine*s. Journal of Energy in Southern Africa, Vol. 19, No. 3, Cape Town, 2008: 4–19.

10. Mojtaba Babaelahi and Hoseyn Sayyaadi. *Modified PSVL: a second order model for thermal simulation of Stirling engines based on convective – polytropic heat transfer of working spaces.* Applied Thermal Engineering, 85:340–355, 2015: 340–355.

11. Godfrey T Udeh, Stavros Michailos, Derek Ingham, Kevin J Hughes, Lin Ma, Mohammed Pourkashanian. *A new non-ideal second order thermal model with additional loss effects for simulating beta Stirling engines.* Energy Conversion and Management, 206:112493, 2020: 22.

12. Finkelstein, T. "Thermodynamic Analysis of Stirling Engines." *Journal of Spacecraft & Rockets* 4.9 (1967): 1184–1189.

13. Finkelstein, T. "Computer Analysis of Stirling Engines." *Advances in Cryogenic Engineering* 20 (1975): 269–282.

14. Urieli, I. A Computer Simulation of Stirling Cycle Machines. Grand PhD diss. South Africa, Witwatersrand, 1977.

15. Schock, A. "Nodal Analysis of Stirling Cycle Devices." *Proceedings of the 13th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, San Diego, California, August 20-25* San Diego: Society of Automotive Engineers, 1978: 1771–1779.

16. Tew, R. C. *Computer Program for Stirling Engine Performance Calculations. NASA/TM-82960.* National Aeronautics and Space Administration, 1983: 129.

17. Organ, A. J. *Thermodynamics and Gas Dynamics of the Stirling Cycle Machine.* Cambridge: Cambridge University Press, 1992: 415.

18. Andrew Peter Robson, *Third Order Analysis of a Low Temperature Differential Ringbom-Stirling Engine*. Ph.D. dissertation. Napier University, Edinburgh, Scotland, 2007: 257.

19. Hao Qiu, Kai Wang, Peifeng Yu, Mingjiang Ni, Gang Xiao. *A third-order numerical model and transient characterization of a β-type Stirling engine*. Energy, Vol. 222, 1 May 2021, 119973, 2021: 18.

20. Dyson, R. W., S. D. Wilson and R. C. Tew. *Review of Computational Stirling Analysis Methods. NASA/TM—2004-213300.* Cleveland, Ohio: Glenn Research Center, 2004: 28.

21. Kuban L, Stempka J, Tyliszczak A. *A 3D-CFD study of a γ-type Stirling engine*. Energy 2019, Volume 169,142-159, 2019: 142–159.

22. George-Rafael Domenikos, Irene Koronaki,Theodoros Papingiotis, Panagiotis Bitsikas. *Parametric Numerical Analysis of β-Type Stirling Engine*. Energies 2023, 16(18), 6518, 2023: 14.

23. Santiago Laín, Valentina Villamil, Juan R. Vidal. *CFD Simulation of Stirling Engines: A Review*. Processes 2024, 12(11), 2360, 2024: 26.

24. Stolyarov, S. P. and A. S. Stolyarov. "Opyt vypolneniya raschetno-eksperimental'nykh issledovaniy mashin Stirlinga s ispol'zovaniem programmnogo kompleksa «BS-STIRLIN»." *Aktual'nye problemy razvitiya porshnevykh DVS: materialy mezhotraslevoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* SPb.: Izdatel'skiy tsentr SPbGMTU, 2008: 40–43.

25. Stolyarov, S. P., M. Ye and A. S. Stolyarov. "Basic equation for a mathematical model of the stirling engine main duct element taking into account the heat transfer process." *Engines Construction* 2(296) (2024): 69–74.

26. Stolyarov, S. P. and Ye Maung. "Mathematical formalization of the method for determining the coefficients of hydraulic resistance for sudden expansion and contraction of working fluid flow." *Natural and Technical Sciences* 1(212) (2026): 223–231. DOI: 10.25633/ETN.2026.01.19.

27. Stolyarov, S. P. and Ye Maung. "New analytical method for calculation of dual hydraulic resistances in the internal circuit of a stirling engine." *Natural and Technical Sciences* 1(212) (2026): 232–239. DOI: 10.25633/ETN.2026.01.20.

28. Stolyarov, S. P., A. S. Stolyarov and Ye Maung. "New analytical method for Stirling engine thermodynamic cycle calculation using simplified adiabatic model." *Proceedings of the 20th International Stirling Engine Conference* Neaples: Cnr Edizioni, 2024: 219–230. DOI: 10.48221/ISEC20-2024.

29. Stolyarov, S. P., A. S. Stolyarov and Ye Maung. "Metod rascheta davleniya v tsikle dvigatelya Stirlinga po uproschennoy adiabatnoy metodike ." *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 68-69 (2022): 122–129.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Столяров Сергей Павлович —
кандидат технических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный
морской технический университет
190121, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: *stsp56@yandex.ru*

Йе Маунг —
аспирант кафедры судовых ДВС
и дизельных установок
Санкт-Петербургский государственный
морской технический университет
190121, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: *ie.maung@yandex.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Stolyarov, Sergey P. —
PhD in Technical Sciences, Associate Professor
St. Petersburg State Marine
Technical University
3, Lotsmanskaya Str., St. Petersburg,
190121, Russian Federation
e-mail: *stsp56@yandex.ru*

Ye Maung—
Postgraduate student of the Department of Marine Internal
Combustion Engines and Diesel Propulsion Systems
St. Petersburg State Marine
Technical University
3, Lotsmanskaya Str., St. Petersburg,
190121, Russian Federation
e-mail: *ie.maung@yandex.ru*

Статья поступила в редакцию: 03 марта 2026 г.
Received: March 3, 2026.

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

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-515-524 **EDN YXOMBS**

УДК 004.6:656.6

ЭНТРОПИЙНЫЙ АСПЕКТ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОЕКТНОЙ НАДЕЖНОСТИ АСУ

В. В. Коротков, М. Ю. Ястребов

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

Темой работы является исследование и анализ формального определения и содержательной интерпретации информационной оценки проектной надежности АСУ для больших объектов водного транспорта с их распределенной дислокацией, таких как порты, судоходные компании и региональные сети регулируемых внутренних водных путей. Введено понятие «энтропии проекта» и связанной с ней меры информационной неопределенности в увязке с оптимизационными математическими моделями взаимодействия показателей надежности и стоимости АСУ. Выполнен обзор и анализ публикаций по теме переноса теоретико-вероятностного определения Шеннона и Хинчина энтропии конечной схемы полной системы событий на модели функционирования технических и технико-экономических систем, а также связи энтропии проекта и информации по Колмогорову с оптимизационными аспектами проектирования. Сформулировано понятие проектной энтропии применительно к математическим моделям оптимизации проектной надежности на стадии разработки. Описан способ построения оценки энтропии применительно к эскизному проекту АСУ производственно-экономической системы водного транспорта с выделением в ней подсистем аппаратного контура, программного обеспечения и хранения данных, которые были описаны в предыдущих публикациях первого автора статьи. В работе энтропия выступает как мера теряемой информации при отклонении проекта от (квази)оптимального варианта. В качестве факторов надежности — аргументов целевой функции — используются технические показатели длительности наработки на отказ и длительности восстановления, а также экономические показатели начальной стоимости технических средств и стоимости восстановления, актуальных в условиях ограниченности общего бюджета АСУ на протяжении ее жизненного цикла. Показано, что значение энтропии оптимального плана экстремальной задачи на дискретной конечной допустимой области равно логарифму от ее объема. Сделан вывод о максимальной неопределенности оптимального плана и наибольшей полноте использования информации, представленной допустимой областью ограничений.

Ключевые слова: энтропия, вероятность, информация, проектирование, автоматизированные системы управления, надежность, математическое моделирование, оптимизация, водный транспорт, математические модели.

Для цитирования:
Коротков В. В. Энтропийный аспект оптимизационных моделей проектной надежности АСУ объектов водного транспорта / В. В. Коротков, М. Ю. Ястребов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 3. С. 515–524. EDN YXOMBS. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-515-524.

ENTROPY ASPECT OF OPTIMIZATION MODELS FOR THE DESIGN RELIABILITY OF AUTOMATED CONTROL SYSTEMS

V. V. Korotkov, M. Y. Yastrebov

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

The paper studies and analyzes the formal definition and substantive interpretation of an information-based assessment of the design reliability of automated control systems for large water transport facilities with distributed

locations, such as ports, shipping companies, and regional networks of regulated inland waterways. The concept of "project entropy" and the related measure of information uncertainty are introduced in connection with optimization mathematical models describing the interaction between reliability and cost indicators of automated control systems. The paper reviews and analyzes publications dealing with the transfer of the probabilistic-theoretical definition of entropy of a finite scheme of a complete system of events, proposed by Shannon and Khinchin, to models of the functioning of technical and techno-economic systems, as well as publications on the relationship between project entropy and Kolmogorov information in the context of optimization aspects of design. The concept of design entropy is formulated with regard to mathematical models for optimizing design reliability at the development stage. A method is described for constructing an entropy estimate for the preliminary design of an automated control system for a water transport production-and-economic system, with hardware, software, and data storage subsystems identified within it, as previously discussed in the first author's publications. In this paper, entropy is treated as a measure of information lost when a project deviates from an optimal or quasi-optimal variant. The reliability factors used as arguments of the objective function include technical indicators, such as mean time between failures and restoration time, as well as economic indicators, including the initial cost of hardware and the cost of restoration, which are relevant under the limited overall budget of an automated control system throughout its life cycle. It is shown that the entropy of the optimal plan of an extremal problem on a discrete finite feasible domain is equal to the logarithm of the domain cardinality. The conclusion is drawn that the optimal plan is characterized by maximum uncertainty and the most complete use of the information represented by the feasible domain of constraints.

Keywords: entropy, probability, information, design, automated control systems, reliability, mathematical modeling, optimization, water transport, mathematical models.

For citation:
Korotkov, Vitaliy V. and M. Y. Yastrebov. "Entropy aspect of optimization models for the design reliability of automated control cystems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.3 (2026): 515–524. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-515-524.

Введение (Introduction

Всесторонняя оценка проектной надежности разрабатываемой автоматизированной системы управления объектом водного транспорта, является важным этапов проектирования имеет своей методологической основой соответствующий государственный стандарт. Надежность входит составляющей в многокомпонентную оценку эффективности любой технической системы. Как и в случае общей эффективности, оценка надежности может проводиться в техническом ключе (безотказность, работоспособность), экономическом (стоимость) и информационном.

Понятие *информационной энтропии*, которое было введено К. Шенноном в 1949 г., получило строгое математическое обоснование в работе А. Я. Хинчина 1953 г. [1]. Исходным полем приложения информационной энтропии был анализ передачи сигналов по каналу с шумом. Позднее в ряде публикаций было рассмотрено применение энтропии к экономическим процессам и к системам управления производственно-экономическими системами (в последнем случае энтропию связывают не с сигналами, как это было первоначально, а с их информационной ценностной интерпретацией). Количество информации определяется как разность соответствующих значений энтропии: $I = H_1 - H_0$. В статье [2, с. 31], посвященной связи информации с управлением (в данном случае — с управлением проектом), возможно, первой в рамках обсуждаемой темы, отмечается следующее: «*Количество информации…, связанной с изменением объекта, обычно не согласуется с задачами управления, достижением определенных целей*». Этот тезис можно считать предпосылкой к рассмотрению в рамках экстремальных задач не только абсолютного оптимума, но и близких в определенном смысле к нему вариантов. Там же отмечается возможность использования информации / энтропии в смысле Шеннона – Хинчина во взаимосвязи с экономическим эффектом, а также ее связь с параметрами модели.

Авторы [3] трактуют энтропию технической системы как меру ее структурного многообразия, что не следует напрямую из определения, поскольку набор вероятностей состояний (p_1, p_2, ..., p_n) вместе с (большим) n характеризует, как представляется, многообразие состояний, а не структуры. Представляется, что структурная энтропия системы, проекта может являться отдельной частью системно-информационного анализа (в первую очередь в части).

В публикации [4] декларируется целесообразность применения информационной энтропии к анализу надежности сложных систем (впрочем, без описания примеров дефиниции — содержательной либо формульной, — и примеров измерения для конкретных технических систем). Статья [5] посвящена связи энтропии с описывающими некоторые физико-технические процессы системами дифференциальных уравнений, из которых получаются значения вероятностей.

Стоимостной подход к определению энтропии в функции оценки качества системы (проекта) получил развитие в исследованиях экономико-кибернетического характера. С новым понятием «энтропийного риска (в части денежного выражения) связана публикация [6], в которой помимо классической связи *энтропия – информация* обсуждается введенная авторами *энергоэнтропия*. Как следует из содержания, при этом классическая энтропия (информационная) отождествляется со структурной энтропией проектной организации, но не разрабатываемого проекта. Содержание последнего термина в тексте не раскрывается. Укажем в этой связи, что и первая, и вторая являются *системами*, так что объект рассмотрения данной статьи можно толковать, как энергоэнтропию системы вообще.

Энтропийный подход развивается в русле проектно-организационного управления, основным принципом которого является разбиение общей цели на совокупность отдельных, частных целей, формирующих соответствующие проекты. Проектирование АСУ естественным образом также распадается на проекты аппаратного контура, программного обеспечения и системы хранения данных, отдельные части которых могут быть связаны при организации проектирования сетевым графиком настроек и отладок. Поскольку под энергией системы в [6] понимается «денежный эквивалент ресурсов», дальнейшее развитие этого подхода проводится исключительно в экономическом ключе.

В публикации [7] авторы в философском плане обсуждают бинарную оппозицию энтропия – сложность в приложении к системам — объектам и субъектам управления. В [8, с. 63–64] утверждается, что высокий уровень энтропии является одним из факторов отказа информационной системе и стимулом к обновлению ее технического контура в классической формуле (1), служащей определением энтропии, дается новый термин *функции управления*; в качестве полной системы событий выбираются «наиболее существенные состояния» (критерии существенности, как и ключевые в данном вопросе способы расчета соответствующих вероятностей, не представлены).

В работе [9], посвященной диагностике сложных водно-транспортных систем, базой для алгоритмов контроля служит энтропийная оценка информативности, которая рассматривается как наиболее подходящая для ситуаций, в которых сложно получить формализованное аналитическое описание диагностируемой системы. Значение энтропии здесь выступает маркером для выбора контрольных узлов.

Содержанием публикации [10] является трактовка энтропии как количественной меры риска, используемой при анализе надежности информационных систем, и вытекающая отсюда возможность ее использования для управления рисками. Такая же область применения для энтропии предлагается в [11], где приведены формулы, в которых «энтропия детали» выражается через традиционные функциональные характеристики, используемые в теории надежности. Близко к [10] по развиваемому подходу является содержание статьи [12]. Здесь для оценки надежности информационной системы, в том числе в терминах рисков, реализуется теоретико-графовый подход, когда формулируется правило приписывания энтропии узлам дерева отказов.

В [13] энтропия как мера неопределенности информации применяется для анализа структурной надежности электроэнергетических объектов; констатируется актуальность задачи разработки методов обеспечения надежности на стадии проектирования (см. публикации [14, 15]). Предметом рассмотрения публикации [16] является применение энтропии для статистического анализа больших данных. В постановочной публикации [17] декларируется целесообразность использование параметризованного функционального обобщения классической энтропии Шеннона, а именно энтропии Реньи, в качестве эффективного индикатора степени отклонения системы от равновесного состояния.

Целью данной статьи является включение энтропийных характеристик в математические модели оптимизации надежности, выражаемые задачами математического программирования. Для обеспечения этого в статье решаются задачи формализации проектной энтропии и построения экстремальных моделей надежности, включающих энтропийные оценки.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Обеспечение надежности проектируемого автоматизированного управления, как и других его характеристик, носит итерационный характер, причем на каждом отдельном этапе проекта проектировщику желательно иметь в распоряжении адекватные количественные оценки надежности крупных структурных элементов: аппаратного контура (АК), программного обеспечения и системы хранения данных (СХД).

Отсюда следует важность информационного оценивания проекта, причем в аспекте надежности речь должна идти в том числе о должным образом формализованной оценке связи надежности и информационной неопределенности. Понятие *количества информации* тесно связано с мерой неопределенности, присутствующей в проекте, а для последней (вслед за статистической физикой) было дано формальное количественное определение в виде энтропии [1]. В этой работе было показано, что мера неопределенности H дискретной полной системы событий (в частности, в качестве событий могут выступать значения случайной величины) с распределением вероятностей $(p_1, p_2, ..., p_n)$, отвечающая естественному перечню аксиом, имеет вид с фиксированным основанием логарифма (большим единицы). Таким образом, энтропия H дискретной случайной величины X с распределением $\{x_1, x_2, ..., x_k; p_1, p_2, ..., p_k\}$, где x_i — ее возможные значения, а p_i — вероятности значений, задается формулой

$$\mathrm{H}(p_1, p_2, ..., p_k) = -\sum_{i=1}^{k} p_i \ln p_i, \tag{1}$$

в которой значения случайной величины не участвуют, что дает поле для обобщений. В частности, допустимо заменить *значение случайной величины* содержательным понятием *случайное состояние системы*.

Поскольку результат испытания снимает неопределенность, количество I получаемой при этом информации принимается равным энтропии полной системы:

$$I(p_1, p_2, ..., p_n) = \mathrm{H}(p_1, p_2, ..., p_n). \tag{2}$$

Для обобщения понятия энтропии на проектную надежность распределенной человеко-машинной вычислительной системы, в частности на АСУ, необходимо связать выделенную разумно ограниченную совокупность существенных состояний системы с вероятностями этих состояний, подсчет которых, в свою очередь, требует обоснования.

Обобщение содержательного понимания энтропии и формулы (1) происходит с использованием различных методологий.

Энтропийно-информационный подход к моделям оптимизации проектной надежности. В рамках сформулированной ранее цели — развития понятия *энтропии проекта* — рассматриваются следующие задачи. Во-первых, выработка общего подхода к включению классического понятия энтропии в оптимизационные модели, представленные задачами математического программирования, и во-вторых, применение этого подхода к безразмерному показателю проектной надежности аппаратного контура АСУ — множителю в агрегированном интегральном показателе проектной надежности в целом [16].

Энтропия в моделях математического программирования. Общая структура оптимального управления / проекта / плана по некоторому критерию k, являющемуся функцией от управляемых переменных $X = (x_1, ..., x_n)$: $k = f(X)$, заданной в области ограничений $D \subset R^n$ для варианта максимизации критерия (в случае проектной надежности АСУ) имеет вид:

$$f(X) \to \max; \tag{3}$$

$$X \in D. \tag{4}$$

Пусть максимум f достигается в точке $X_0 = (x_1^{(0)},...,x_n^{(0)})$ и $k_0 = f(X_0)$. Энтропийный подход к оптимизации проекта подразумевает установление априорно заданного соответствия $X \to \mathrm{H}(X)$, связывающего энтропийно-информационную характеристику $\mathrm{H}(X)$ варианта проекта X (потерю информации при отходе от X_0) с критериальной функцией f с ее совокупностями D и $f(D)$ аргументов и значений.

Это можно сделать в виде композиции функций, проведя отображение H через f: если $f(X) = k$,

$$\mathrm{H}(X) = h(k). \tag{5}$$

В данной связи отметим публикацию [4], в которой в принятых в данной работе обозначениях h — отображение, заданное энтропийным оператором только при одном, а именно оптимальном значении критерия k_0: по определению полагается $h(k_0) = 0$ («оптимальное состояние следует рассматривать как полностью упорядоченное»). В этом тезисе усматривается аналогия с физическим принципом максимальной устойчивости замкнутой системы, т. е. пребывании ее в наиболее вероятном состоянии при минимуме потенциальной энергии.

Введем далее следующие обозначения: для произвольного подмножества $B \subset D$ число $\mu(B)$ — количество его элементов. Для $k \in f(D)$ обозначим через $\tau(k)$ — совокупность тех X, для которых $f(X) = k$: $\tau(k) = f^{-1}(k)$; $\tau(k) \subset D$. Далее пусть $\sigma(k) = \{X \mid f(X) \le k\}$, так что $\tau(k) \subset \sigma(k)$. Для введения понятия вероятности состояния $p(k)$ будем исходить из числа $p'(k) = \dfrac{\mu(\tau(k))}{\mu(D)}$, при котором, очевидно, выполняется неравенство $0 \le p'(k) \le 1$. Для обеспечения накладываемого на вероятности закона распределения условия $\sum\limits_{k \in f(D)} p(k) = 1$ проведем нормировку: пусть $A = \sum\limits_{k \in f(D)} p'(k)$ — нормирующий множитель; полагаем $p(k) = p'(k) / A$; тогда по аналогии с (1) запишем

$$\mathrm{H}(X) = -\sum_{k \in f(D)} A \frac{\mu(\tau(k))}{\mu(D)} \log_2 (A \frac{\mu(\tau(k))}{\mu(D)}). \tag{6}$$

Если $k_M = \min\limits_{X \in D} f(X)$ — значение критерия, наиболее удаленное от оптимального (наихудшее), то $D = \sigma(k_M)$ и (6) можно записать в виде

$$\mathrm{H}(X) = -\sum_{k \in f(D)} A \frac{\mu(\tau(k))}{\mu(\sigma(k_M))} \cdot \log_2 (A \frac{\mu(\tau(k))}{\mu(\sigma(k_M))}). \tag{7}$$

Следует отметить, что проведя тождественное преобразование в выражении для $p(k)$, получим выражение, аналогичное утверждению теоремы умножения вероятностей для случайных событий, а именно

$$p(k) = A \frac{\mu(\tau(k))}{\mu(\sigma(k))} \frac{\mu(\sigma(k))}{\mu(D)}.$$

Здесь второй множитель трактуется как вероятность выбора состояния с критериальным значением k из совокупности состояний с не лучшим, чем k значением критерия, а второй — как вероятность такой совокупности; обозначив их, соответственно, как $p(k / \sigma)$ и $p(\sigma(k))$, получим

$$p(k) = p(k / \sigma) \cdot p(\sigma(k)).$$

Исходя из структуры формулы (7), перейдем от энтропии произвольного состояния проекта X к связанной с этим состоянием энтропии соответствующего значения $k = f(X)$ критерия оптимизационной модели:

$$\mathrm{H}(X) = h(k) = -\sum_{q \in f(D)} \frac{\mu(\tau(q))}{\mu(\sigma(k))} \cdot \log_2 \frac{\mu(\tau(q))}{\mu(\sigma(k))}, \tag{8}$$

где, согласно формуле (5), правая часть — энтропийный оператор.

Разность значений энтропии:

$$h(k)-h(k_0)=-\sum_{q\in f(D)} A\frac{\mu(\tau(q))}{\mu(\sigma(k))}\cdot\log_2\frac{\mu(\tau(q))}{\mu(\sigma(k))}+\sum_{q\in f(D)} A\frac{\mu(\tau(q))}{\mu(D)}\cdot\log_2(A\frac{\mu(\tau(q))}{\mu(D)}),$$

выражает количество информации, содержащейся в вариантах проекта с лучшим, чем k значением критерия

Таким образом, при выборе в качестве проектного решения из неформализованных в модели (3), (4), (10) со значением критерия $k > k_0$, утрачивается информация, заложенная в вариантах проекта с лучшим, чем k, значением критерия в объеме $I = h(k_0) - h(k)$.

Энтропия проектного варианта аппаратного контура АСУ. Рассмотрим в качестве примера применение изложенного подхода к энтропийной оценке вариантов оснащения АСУ техническими средствами и к связанной с ней оценке потери информации при неоптимальном по формальному критерию варианте. В публикации [16] получена формула для построения интегрального показателя проектной надежности АСУ в целом и ее подсистем. Далее, в [17] представлена совокупность альтернативных дискретных и континуальных моделей оптимизации проекта аппаратного контура, где показатель надежности выступает наряду со стоимостью проекта в роли критерия либо ограничения.

При разработке проекта аппаратного контура сравнению подвергается ограниченное количество N вариантов $V_1, \ldots, V_j, \ldots, V_N$, определяемых текущим состоянием рынка, так что векторная совокупность D и числовая совокупность $f(D)$ являются дискретными и конечными.

Совокупность D строится следующим образом. С каждым техническим устройством Y_i ($i = 1, 2, \ldots, m$), включаемым хотя бы в единственном числе хотя бы в один из вариантов проекта оснащения, связывается целая неотрицательная переменная x_{ij}, равная количеству однотипных устройств i, входящих проектный вариант j, и равная 0 в противном случае.

Матрицу $X = (x_{ij})$, охватывающую все проектные варианты, назовем *аналитическим состоянием проекта*. Отдельному варианту V_j соответствует обозначаемая так же j-я строка: $V_j = (x_{ij} / i = 1, \ldots, m)$. Параметры модели разбиты на четыре группы по числу используемых характеристик технических средств — средней длительности наработки на отказ, средней длительности восстановления, начальной стоимости и стоимости восстановления — соответственно, $\eta_i, \theta_i, c_i, z_i \ \ (i = 1, \ldots, m)$.

Надежность j-го варианта, согласно [16], выражается через указанные параметры в мультипликативном виде, а именно

$$\text{Н}_{\text{ап}}^{(j)} = \text{Н}_{\text{ап}}(V_j) = \prod_{i=1}^{m} x_{ij} d_i / \delta_i.$$

Здесь $\eta_{\max}^{(i)} = \max(\eta_1^{(i)}, \ldots, \eta_{n_i}^{(i)})$, $d_j^{(i)} = \eta_{\max}^{(i)} / \eta_j^{(i)}$ — вес отказной характеристики i-го технического элемента на длительности $\eta_{\max}^{(i)}$; аналогично $\theta_{\max}^{(i)} = \max(\theta_1^{(i)}, \ldots, \theta_{n_i}^{(i)})$, $\delta_j^{(i)} = \theta_{\max}^{(i)} / \theta_j^{(i)}$.

В свою очередь, полная стоимость варианта с учетом затрат на восстановление задается аддитивным выражением:

$$C^{(j)} = C^{(j)}(V_j) = \sum_{i=1}^{m} x_{ij}(c_i + z_i / \eta_i).$$

Оптимизация проекта по критерию надежности варианта приводит к модели:

$$f(V) = \text{Н}_{\text{ап}}(V) \to \max_j \tag{9}$$

при ограничении сверху на стоимость

$$C \le C_0, \tag{10}$$

где C_0 определяется бюджетом проекта и может варьироваться в некотором диапазоне при анализе проекта в диалоговом режиме.

Если $V^{(0)} = (x_{j_0 i})$ — оптимальный вариант, $k_0 = f(V^{(0)})$, причем все варианты приводят к различным значениям критерия, то для модели (6)–(8) имеем $\tau(k_0) = \{V^{(0)}\}$, $\mu(\tau(k_0)) = 1$, $\sigma(k_0) = D$, $\mu(\sigma(k_0)) = N$, $p'(k) = 1/N$ для всех $k \in f(D)$, так что $A = N/N = 1$. В этом случае

$$\mathrm{H}(V^{(0)}) = h(k_0) = -\sum_{i=1}^{N} \frac{1}{N} \cdot \log_2 \frac{1}{N} = -N \cdot \frac{1}{N} \cdot \log_2 \frac{1}{N} = \log_2 N. \quad (11)$$

Таким образом, энтропия оказывается возрастающей функцией от количества N рассматриваемых вариантов проекта. Это согласуется с ожидаемым при увеличении N ростом неопределенности.

Пусть теперь в качестве альтернативного рассматривается вариант $V^{(1)} = (x_{j_1 i})$, $f(V^{(1)}) = k_1$, и при этом к не лучшим, чем k_1, значениям критерия приводят N_1 вариантов из совокупности $\sigma(k_1) = D_1$, так что количество исключаемых из рассмотрения вариантов равно $N - N_1$. Аналогично (11) получаем $\tau(k_1) = \{V^{(1)}\}$, $\mu(\tau(k_1)) = 1$, $\mu(\sigma(k_1)) = N_1$.

Тогда

$$\mathrm{H}(V^{(1)}) = h(k_1) = -\sum_{i=1}^{N_1} \frac{1}{N_1} \cdot \log_2 \frac{N_1}{N} = \log_2 \frac{N}{N_1},$$

при этом количество теряемой информации

$$I = \mathrm{H}(V^{(0)}) - \mathrm{H}(V^{(1)}) = \log_2 N - \log_2 \frac{N}{N_1} = \log_2 N_1.$$

Энтропийная оценка объединенных подсистем. Технология проектирования подсистем аппаратного контура, программного обеспечения и хранения данных предполагает их взаимную увязку, так что их энтропийно-информационные характеристики надежности нельзя считать независимыми. Поэтому целесообразно введение условной энтропии объединения двух подсистем по схеме Шеннона – Хинчина [2], в которой для зависимых схем событий $A = (A_i; p_i)$ и $B = (B_j; q_j)$ энтропия $\mathrm{H}(AB)$ их объединения задается выражением

$$\mathrm{H}(AB) = \mathrm{H}(A) + \mathrm{H}_A(B) = \mathrm{H}(A)) + \sum_k p_k \mathrm{H}_k(B), \quad (12)$$

где $\mathrm{H}_k(B) = \sum_l q_{kl} \cdot \log q_{kl}$, q_{kl} — вероятность того, что в схеме B наступит событие B_l при условии, что в схеме A наступило событие A_k.

Если теперь в проекте к уже имеющейся подсистеме α присоединяется новая подсистема β и для них обеих использованы оптимизационные модели типа (3)–(4) с функциями f_α, f_β, и их неоптимальные значения k_α, k_β достигаются на векторах состояний U_α, U_β соответственно, то потерю информации I в проекте объединенной подсистемы αβ при условии неоптимального значения критерия β, следуя (12), определим формулой

$$I = \mathrm{H}(U_\alpha U_\beta) = \mathrm{H}(U_\alpha) + \sum_{k \in \sigma(k_\beta)} p(k) h(k).$$

При формальной симметрии схем A и B, как и подсистем α и β, содержательный анализ показывает, что при объединении подсистем АК и ПО ведущую роль следует отвести АК, поскольку программирование, особенно в части трафика данных, ориентируется на элементную базу. Такой же подход целесообразен при объединении отдельных функциональных подсистем внутри аппаратного контура.

Результаты исследования и их обсуждение (Results and Discussion)

Математическое моделирование в проблеме оптимизации проекта АСУ, проводимое в бинарной оппозиции «надежность – стоимость» приводит к задачам математического

программирования — поиску оптимума целевой функции на допустимой области. Для этой задачи вводится энтропийно-информационная характеристика проекта. Именно по аналогии с классическим определением энтропии Шеннона – Хинчина дается определение энтропии проекта по совокупности привлекаемых в нем к рассмотрению вариантов и по используемому критерию. С энтропией проекта связывается количественная мера информации, содержащейся в области допустимых вариантов. На этой основе получено выражение для количественной оценки информации, теряемой при принятии варианта проекта аппаратного контура АСУ, неоптимального в смысле используемого критерия.

Описанный подход может быть использован для анализа в информационном аспекте широкого спектра задач оптимизации на транспорте.

Заключение (Conclusion)

В рамках проблемы обеспечения надежности АСУ на ранней стадии проектирования научный интерес представляет энтропийно-информационный анализ оптимизирующих методов как в части построения показателя энтропии варианта проекта, так и в аспекте оценки того количества информации, содержащейся в исходных данных, которое теряется при принятии проекта, альтернативному оптимальному. Методологической основой предложенного подхода служит классическое определение энтропии по Шеннону – Хинчину.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Хинчин, А. Я.* Понятие энтропии в теории вероятностей / А. Я. Хинчин // Успехи математических наук. — 1953. — Т. 8. — № 3 (55). — С. 3–20.

2. *Соколов В. К.* О связи информации и экономического эффекта АСДУ / В. К. Соколов // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1989. — № 4. — С. 31–37.

3. Энтропийный анализ сложных систем как инструмент инженерной деятельности / А. В. Благин, Л. В. Благина, И. Г. Попова, Ю. В. Сахарова // Инженерный вестник Дона. — 2018. — № 4(51). — С. 16. EDN YMEBQV.

4. *Дулесов А. С.* Оценка возможностей измерения количества энтропии в анализе надежности технических систем / А. С. Дулесов, Н. С. Федоренко, А. В. Байшев // Вестник Хакасского государственного университета имени Н. Ф. Катанова. — 2021. — № 1(35). — С. 43–48. EDN NQYCPQ.

5. *Лицкевич А. П.* Энтропийный подход к анализу надежности технических объектов / А. П. Лицкевич, Б. Н. Лобов, С. А. Лицкевич // Транспортное дело России. — 2017. — № 3. — С. 107–110. EDN ZDGPYV.

6. *Бондарь А.* Управление проектами в борьбе с энтропией организации / А. Бондарь, С. Бушуев, С. Онищенко // Scientific Journal of Astana IT University. — 2020. — Т. 2. — № 2. — С. 60–70. EDN TGDRNS. DOI: 10.37943/AITU.2020.88.62.006.

7. *Кокин А. В.* Энтропия сложности и сложность управления / А. В. Кокин, Т. У. Албакова // Государственное и муниципальное управление. Ученые записки СКАГС. — 2012. — № 1. — С. 15–28. EDN QATHYX.

8. *Азаренкова Н. В.* Механизмы регулирования энтропии в корпоративных информационных системах / Н. В. Азаренкова // Известия Алтайского государственного университета. — 2013. — № 1-2(77). — С. 063–065. EDN ROXKYV.

9. *Чертков А. А.* Оценка диагностических параметров сложных систем на водном транспорте на основе энтропийного подхода / А. А. Чертков, В. Ю. Иванюк, Я. Н. Каск // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. — 2023. — № 3. — С. 29–36. EDN KWCOFI. DOI: 10.24143/2072-9502-2023-3-29-36.

10. *Карасев В. В.* Энтропия сложных систем как мера риска / В. В. Карасев // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2025) : Труды конференции, Санкт-Петербург, 15–17 октября 2025 года. Санкт-Петербург : АО «ЦТСС», 2025. С. 821–832. EDN PMZJHM.

11. Метод контроля надежности технических систем путем выявления энтропии причин их отказов / А. Т. Рыбак, С. В. Теплякова, А. В. Ольшевская, А. С. Пруцков // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). — 2025. — Т. 25. — № 2. — С. 112–119. EDN BSPTKA. DOI: 10.23947/2687-1653-2025-25-2-112-119.

12. *Дулесов А. С.* Энтропийно-вероятностный анализ дерева событий / А. С. Дулесов, Н. С. Федоренко // Научно-технический вестник Поволжья. — 2023. — № 6. — С. 152–157. EDN FAYUEE.

13. *Дулесов А. С.* Прикладное значение энтропии А. Хинчина в анализе структурной надежности распределительных электрических сетей / А. С. Дулесов, Н. В. Дулесова, Н. С. Федоренко // Научно-технический вестник Поволжья. — 2023. — № 9. — С. 81–85. EDN NQHGGJ.

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. EDN WVZEVZ. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-449-458.

15. *Коротков В. В.* Математические модели проектной оптимизации аппаратного контура АСУ / В. В. Коротков // Наука и техника транспорта. — 2026. — № 1. — С. 20–29.

16. *Байыр Д. Б.* Применимость энтропии в анализе разброса данных о состоянии технической системы / Д. Б. Байыр, А. С. Дулесов, Е. В. Пупкова // Вестник ГГНТУ. Технические науки. — 2025. — Т. 21. — № 2(40). — С. 25–33. EDN FXSQSY.

17. *Байыр Д. Б.* Анализ технических систем на основе энтропии Альфреда Реньи / Д. Б. Байыр, А. С. Дулесов // Всероссийский научный журнал «Вопросы права». — 2024. — № 2. — С. 179–181. EDN EJEUTY.

REFERENCES

1. Khinchin, A. Ya. "Ponyatie entropii v teorii veroyatnostey." *Uspekhi matematicheskikh nauk* 8.3 (55) (1953): 3–20.

2. Sokolov, V. K. "O svyazi informatsii i ekonomicheskogo effekta ASDU." *Izvestiya AN SSSR. Energetika i transport* 4 (1989): 31–37.

3. Blagin, A. V., L. V. Blagina, I. G. Popova and Yu. V. Sakharova. "Entropy analysis of complex systems as a tool of engineering activity." *Ingineering Journal of Don* 4(51) (2018): 16.

4. Dulesov, A. S., N. S. Fedorenko and A. V. Bayshev. "Estimation of the possibilities of measuring the amount of entropy in the analysis of the reliability of technical systems." *Vestnik Khakasskogo gosudarstvennogo universiteta imeni N.F. Katanova* 1(35) (2021): 43–48.

5. Litskevich, A. P., B. N. Lobov and S. A. Litskevich. "Entropic approach to the analysis of reliability technical objects." *Transport Business in Russia* 3 (2017): 107–110.

6. Bondar', A., S. Bushuev and S. Onischenko. "Project management fighting against entropy of the organization." *Scientific Journal of Astana IT University* 2.2 (2020): 60–70. DOI: 10.37943/AITU.2020.88.62.006.

7. Kokin, A. V. and T. U. Albakova. "The entropy of complexity and administration complexity." *State and Municipal Management. Scholar Notes* 1 (2012): 15–28.

8. Azarenkova, N. V. "Mechanisms of regulating entropy in corporate information systems." *Izvestiya of Altai State University* 1-2(77) (2013): 063–065.ы

9. Chertkov, A. A., V. Yu. Ivanyuk and Ya. N. Kask. "Evaluation of diagnostic parameters of complex systems in water transport in terms of the entropy approach." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics* 3 (2023): 29–36. DOI: 10.24143/2072-9502-2023-3-29-36.

10. Karasev, V. V. "Entropy of complex systems as a measure of risk." *Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika (IMMOD-2025) : Trudy konferentsii, Sankt-Peterburg, 15–17 oktyabrya 2025 goda* Sankt-Peterburg: AO «TsTSS», 2025: 821–832.

11. Rybak, A. T., S. V. Teplyakova, A. V. Ol'shevskaya and A. S. Prutskov. "A method for monitoring the reliability of technical systems by identifying the entropy of the causes of their failures." *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)* 25.2 (2025): 112–119. DOI: 10.23947/2687-1653-2025-25-2-112-119.

12. Dulesov, A. S. and N. S. Fedorenko. "Entropy-probabilistic event tree analysis." *Scientific and Technical Volga Region Bulletin* 6 (2023): 152–157.

13. Dulesov, A. S., N. V. Dulesova and N. S. Fedorenko. "Applied significance of a. hinchin entropy in structural reliability analysis of electricity distribution networks." Scientific and Technical Volga Region Bulletin 9 (2023): 81–85.

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 imeni admirala S.O. Makarova* 17.3 (2025): 449–458. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-449-458.

15. Korotkov, V. V. "Matematicheskie modeli proektnoy optimizatsii apparatnogo kontura ASU. ." *Nauka i tekhnika transporta* 1 (2026): 20–29.

16. Bayyr, D. B., A. S. Dulesov and E. V. Pupkova. "Possibilities of entropy application in the analysis of data scattering about the state of technical system." *Herald of Gstou. Engineering Sciences* 21.2(40) (2025): 25–33.

17. Bayyr, D. B. and A. S. Dulesov. "Analysis of technical systems based on alfred renyi entropy." *Vserossiyskiy nauchnyy zhurnal "Voprosy prava"* 2 (2024): 179–181.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Коротков Виталий Валерьевич —
доцент кафедры комплексного обеспечения информационной безопасности
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *korotkovvv@gumrf.ru*

Ястребов Михаил Юрьевич —
кандидат экономических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *mikyast@gmail.com*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Korotkov, Vitaliy V. —
Assistant Professor of Department of Integrated Information Security
Admiral Makarov State University of Martime and Inland Shipping
5/7, Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: *korotkovvv@gumrf.ru*

Yastrebov, Mikhail Yu. —
PhD in Economic Sciences
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7, Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: *YastrebovMU@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию: 19 февраля 2026 г.
Received: Feb. 19, 2026.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-525-537 **EDN ZPXJXM**

УДК. 621.398.04

НЕЙРОСЕТЕВОЙ АЛГОРИТМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫБОРКИ ИЗМЕРЕНИЙ ПО КРИТЕРИЮ СОГЛАСИЯ КОЛМОГОРОВА

С. О. Барышников, А. А. Чертков, Я. Н. Каск

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

Целью исследования является мониторинг технического состояния судов и объектов водного транспорта в период эксплуатации и ремонта, а также управление качеством продукции в условиях цифровой трансформации производства и услуг. С этой целью синтезирован алгоритм автоматизации и параметрической идентификации законов распределения для выборок данных измерений времени безотказной работы узлов и приборов судовых систем по критерию согласия Колмогорова с применением численных методов компьютерного моделирования и дифференцирования с применением нейросетевой регрессии полученной плотности вероятностей. Алгоритм применим в автоматизированных системах управления программно-измерительных комплексах на судах и объектах водного транспорта при обработке результатов наблюдений, измерений, контроля и испытаниях продукции. Кроме того, предложенный алгоритм может быть использован в тех случаях, когда при обработке экспериментальных данных приходится решать задачи анализа статистических свойств распределений, не всегда вписывающихся в рамки теории нормальных процессов, для которых разработаны статистические параметрические критерии Стьюдента, Фишера и непараметрические — Колмогорова – Смирнова, Крамера – Мизеса, Андерсена – Дарлинга, Купера и другие критерии. В отличие от параметрических критериев, базирующихся на предположении, что распределение статистики подчиняется нормальному (гауссовому) закону, непараметрические критерии свободны от допущения о известном законе распределения выборок и предназначены для сопоставления эмпирического распределения с теоретическим, например, нормальным, или с другим эмпирическим распределением. Для их реализации формулируются нулевая и альтернативная гипотезы, для проверки которых с применением аналитических и численных методов статистического анализа строятся вероятностные модели эмпирической и гипотетической функций распределения и определяется их расхождение. С учетом высоких требований к точности, которым аналитические методы удовлетворять не могут, разработан и реализован в виде программы алгоритм идентификации (по показателю достоверности) проверяемого распределения на соответствие нормальному распределению по критерию согласия Колмогорова с оценкой параметров (математического ожидания и стандартного отклонения) этого распределения с применением нейронной сети прямого распространения с обратными связями, обеспечивающей быстрое обучение и приемлемую точность. Результаты компьютерного и численного моделирования нейросетевого алгоритма параметрической идентификации подтверждают адекватность проверяемой вероятностной модели заданному нормальному распределению.

Ключевые слова: алгоритм, выборка, гипотеза, закон распределения, идентификация, модель, критерий Колмогорова, функция распределения, уровень значимости, выборочные характеристики.

Для цитирования:
Барышников С. О. Нейросетевой алгоритм параметрической идентификации законов распределения данных измерений по критерию согласия Колмогорова / С. О. Барышников, А. А. Чертков, Я. Н. Каск // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 3. С. 525–537. EDN ZPXJXM. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-525-537.

NEURAL NETWORK ALGORITHM FOR PARAMETRIC IDENTIFICATION OF DISTRIBUTION LAWS FOR MEASUREMENT SAMPLES USING THE KOLMOGOROV GOODNESS-OF-FIT CRITERION

S. O. Baryshnikov, A. A. Chertkov, Ya. N. Kask

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

The purpose of the study is to monitor the technical condition of ships and water transport facilities during operation and repair, as well as to manage product quality under the digital transformation of production and services. For this purpose, an algorithm has been synthesized for automating the parametric identification of distribution laws for samples of measured time-to-failure data of components and instruments of ship systems using the Kolmogorov goodness-of-fit criterion, numerical methods of computer simulation and differentiation, and neural-network regression of the obtained probability density. The algorithm is applicable in automated control systems and software-and-measurement complexes on ships and at water transport facilities when processing the results of observations, measurements, inspection, and product testing. In addition, the proposed algorithm can be used in cases where the processing of experimental data requires solving problems related to the analysis of the statistical properties of distributions that do not always fit within the theory of normal processes, for which parametric statistical tests, such as Student's and Fisher's tests, and nonparametric tests, such as the Kolmogorov, Cramér–von Mises–Smirnov, Anderson–Darling, Cooper, and other tests, have been developed. Unlike parametric tests, which are based on the assumption that the statistic follows a normal (Gaussian) distribution, nonparametric tests do not require the assumption of a known sample distribution law and are designed to compare an empirical distribution with a theoretical distribution, for example, a normal distribution, or with another empirical distribution. To implement these tests, null and alternative hypotheses are formulated; to verify them, probabilistic models of empirical and hypothetical distribution functions are constructed using analytical and numerical methods of statistical analysis, and the discrepancy between them is determined. Taking into account the high accuracy requirements that analytical methods cannot satisfy, an algorithm has been developed and implemented as a software program for identifying, by a confidence indicator, whether the tested distribution conforms to the normal distribution according to the Kolmogorov goodness-of-fit criterion, with estimation of its parameters, namely the mean and standard deviation, using a feedforward neural network with feedback connections, which provides fast training and acceptable accuracy. The results of computer and numerical simulation of the neural-network algorithm for parametric identification confirm the adequacy of the tested probabilistic model to the specified normal distribution.

Keywords: algorithm, sample, hypothesis, distribution law, identification, model, Kolmogorov goodness-of-fit criterion, distribution function, significance level, sample.

For citation:
Baryshnikov, Sergey O., A. A. Chertkov and Ya. N. Kask. "Neural Network Algorithm for Parametric Identification of Distribution Laws for Measurement Samples Using the Kolmogorov Goodness-of-Fit Criterion." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.3 (2026): 525–537. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-525-537.

Введение (Introduction)

Мониторинг технического состояния функционирующих средств на водном транспорте в режиме on-line всегда сопряжен с цифровой обработкой и анализом статистических свойств однородных массивов данных наблюдений, не представляющих всей их совокупности. Как известно, на точность результатов измерений вектора переменных состояния и экспериментальных данных на судах и объектах водного транспорта заметное влияние оказывает случайная составляющая погрешности измерений, для определения которой решается актуальная задача параметрической идентификации закона распределения вероятностей случайной величины, наилучшим образом соответствующего результатам экспериментальных наблюдений.

Проблема состоит в том, что при обработке выборочных групп данных измерений, не являющихся всей их совокупностью, из-за наличия взаимной корреляции среди них закон их внутригруппового распределения не будет строго нормальным (гауссовым) [1]. Эта корреляция является следствием влияния множества факторов случайного и неслучайного характера, действующих постоянно или эпизодически. Отсюда, только при соблюдении определенных (теоретических и технических) предпосылок, погрешности измерений можно идентифицировать вероятностной моделью, наилучшим образом описываемой нормальным законом. Увеличение объема выборки позволяет уменьшить взаимную корреляцию, но не исключает ее, вследствие чего пределом выборочного распределения является всего лишь усеченное нормальное распределение.

Для решения задачи идентификации модели закона группового распределения данных измерений на практике предложен классический подход, в основе которого используется аппарат математической статистики. Данный подход реализуется путем последовательного выполнения

двухэтапной процедуры выбора наилучшей модели из некоторого множества законов распределения.

Первый этап процедуры предусматривает построение согласно выборочным данным модели закона определенного, как правило нормального, распределения из рассматриваемого множества законов, а также оцениваются параметры этой модели. Оценка степени адекватности построенной модели по выборочным данным измерений выполняется на втором этапе с применением различных критериев согласия. В случае адекватности построенной модели, согласно показателям уровня значимости применяемых критериев, можно оценить вероятностные характеристики случайной составляющей погрешности измерений, отличающейся от истинных значений только наличием систематической (неисключенной) составляющей, по величине которой можно судить о степени точности измерений.

В общем случае предложенный двухэтапный подход для выбора i-модели закона распределения можно представить как интерпретацию задачи проверки сложной гипотезы H_{0i}: $H_{0i}: F(x) \in \{F_{0i}(x,q), \theta \in \Theta_i\}$, где $F_{0i}(x, \theta)$ — функция распределения вероятностей известного вида, $x \in X$; θ — искомое значение параметра, принадлежащего пространству параметров Θ_i. Причем параметр θ_i оценивается по исходной выборке.

Важная роль в проверке статистических гипотез отводится параметрическим [2] и непараметрическим [3] критериям согласия, составляющим основу статистического анализа.

Параметрические критерии базируются на предположении, что выборочное распределение подчиняется нормальному (гауссовому) закону, а решение о принадлежности двух выборок одной совокупности можно принять путем расчета параметров вероятностного распределения признака генеральной совокупности: среднего (t-критерий Стьюдента) и дисперсии (F-критерий Фишера) с оценкой их различия [4, 5].

Непараметрические критерии позволяют оценить статистически значимую тенденцию в выявлении различий (Q — Розенбаума, U — Манна – Уитни, λ — Колмогорова – Смирнова, χ^2 — Пирсона) и изменении признака выборочного распределения (T — Уилкоксона, S — Джонкира, L — Пейджа) и вместо параметров вероятностного распределения рассчитывают частоты и ранги. За счет возможности оценки различий в рангах, частотных распределениях и знаках различия непараметрические критерии согласия являются более точными и более универсальными, чем параметрические, так как они не требуют большого объема выборки, не зависят от шкалы измерений данных и исходного распределения признаков по частоте [6, 7].

Немаловажная роль отводится методам параметрического оценивания закона распределения, для которого различия в значении признака распределения по отношению, например, к нормальному (гауссову) распределению будут минимальными.

Целью работы является получение несмещенных, состоятельных, асимптотически эффективных и робастных оценок методом регрессионной оценки параметров нормального распределения с помощью обученной нейронной сети прямого распространения с обратными связями.

Методы и материалы (Methods and Materials)

При эксплуатации объектов водного транспорта актуальной является задача исследования выборки данных $x_1, x_2, \ldots, x_n$ измерения времени безотказной работы приборов, извлеченной из генеральной совокупности с неизвестным законом распределения. С целью идентификации закона распределения формулируются две гипотезы: простая (основная) H_0: $F(x)= F_0(x)$ и сложная (альтернативная) H_1: $F(x) \neq F_0(x)$, где $F_0(x)$ — заданная (теоретическая) функция распределения. На основе результатов проверки этих гипотез может быть два исхода, первый из которых подтверждает соответствие выборочных данных предполагаемой теоретической функции распределения, а второй отвергает это предположение. В связи с этим методы проверки гипотез H_0 и H_1 называются *критериями согласия*. Среди них наиболее широко известны критерии Колмогорова и Пирсона, которые рассмотрим более подробно.

Критерий Пирсона представляет собой непараметрический метод [8], который позволяет оценить значимость расхождений между фактическим количеством исходов случайной величины (эмпирических частот) в каждом интервале разбиения выборки и ожидаемым количеством исходов (теоретических частот) в рассматриваемых интервалах.

В данном критерии согласия оценивается мера расхождения (относительного отклонения) числа выборочных значений, попавших в i-й интервал (эмпирических частот), и вероятности p_i попадания в этот интервал данных выборки $x_1, x_2, \dots x_n$, представляющая собой величину

$$\chi^2_{=01;} = n\sum_{i=1}^{l}\frac{(\frac{m_i}{n}-p_i)^2}{p_i} = \sum_{i=1}^{l}\frac{(m_i-np_i)^2}{np_i}, \quad (1)$$

имеющую распределение χ^2 с $k = l - 1$ степенями свободы, где np_i – теоретические частоты (количество попаданий случайной величины в i-й интервал, вычисленное по предполагаемому закону распределения).

Для практических приложений часто удобно использовать следующее легко выводимое равенство:

$$\chi^2_{=01;} = \sum_{i=1}^{l}\frac{m_i^2}{np_i^2} - n. \quad (2)$$

Согласно известной в математической статистике теореме Пирсона, критерий χ^2 (Пирсона) имеет распределение, стремящееся при $n \to \infty$ к распределению χ^2 с $(l - 1)$ степенями свободы.

Достоинствами критерия Пирсона являются универсальность (использование для анализа как количественных, так и качественных данных) и относительная простота применения (сравнение эмпирических частот с теоретическими частотами).

Недостатки критерия: необходимость достаточно большой выборки для получения надежных результатов, не выявляет силу и направление связи, а только наличие статистической значимости, а также информационные потери из-за группировки результатов наблюдений в интервалы разбиения выборки.

Поскольку критерий Пирсона был подробно исследован в работе [9] в данном случае он не рассматривается.

Критерий Колмогорова представляет собой непараметрический метод для проверки гипотезы о том, что эмпирическое распределение выборки данных наблюдений соответствует предполагаемой модели закона распределения [10]. В этом случае статистики критерия описывается следующим выражением:

$$D = \max_{x\in R}\left|F^*(x) - F(x)\right|, \quad (3)$$

где D — максимальная по модулю разность между эмпирической $F^*(x)$ и теоретической $F(x)$ функциями распределения.

Согласно теореме Колмогорова, предельное значение статистики при объеме выборки $n \to \infty$ сходится к нулю, а закон распределения ее случайной величины $\Lambda = D\sqrt{n}$ имеет следующий вид:

$$F(\lambda) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty}(-1)^k \exp(-2k^2\cdot\lambda^2),\ \lambda\in\Lambda, \quad (4)$$

где λ — реализация случайной величины Λ.

Для принятия нулевой гипотезы H_0 о том, что рассматриваемая выборка подчиняется распределению $F(x)$, должно выполняться условие

$$\lim_{n\to\infty} P(\sqrt{n}D \le \alpha) = F(\alpha), \quad (5)$$

где α — заданный уровень значимости; $F(\alpha)$ — критическая точка распределения (4), значение которой задается в %.

Таким образом, если вычисленная статистика $D\sqrt{n}$ превышает значение критической точки $F(\alpha)$ заданного уровня α, то гипотеза H_0 отвергается.

Достоинствами критерия Колмогорова являются простота и наглядность (не требуются точные значения наблюдений), универсальность и свобода от распределения (не зависит от закона и параметров наблюдаемого распределения при проверке простых гипотез).

К недостаткам можно отнести утрату свойства «свободы от распределения» (при проверке сложных гипотез), недостаточную мощность для различения близких законов и зависимость статистик распределения от метода оценивания при сложных гипотезах.

Поскольку целью работы является проверка сложной гипотезы о принадлежности наблюдаемой выборки некоторому закону, например, нормальному, параметры которого заданы в некотором диапазоне, в дальнейшем для идентификации анализируемых выборок будем применять непараметрический критерий Колмогорова, используя численные методы дифференцирования [11] и средства регрессии нейронных сетей [12].

Первый этап алгоритма идентификации предусматривает построение по выборке данных измерений эмпирических функций для двух предполагаемых моделей законов распределения, один из которых нормальный, а также получение выборочных значений параметров анализируемого распределения средствами среды MATLAB [13].

Для формирования исходной (анализируемой) выборки данных измерений используем функцию *randn*(M, N) среды MATLAB, которая, согласно синтаксису, формирует матрицу размером $M \times N$, содержащую псевдослучайные значения, полученные из стандартного нормального распределения с нулевым средним и стандартным отклонением, равным единице. Такой синтаксис позволяет задавать любые значения среднего a и стандартного отклонения s в формируемой выборке p, например: $p = a + s \cdot randn(M, N)$.

Пусть целью работы является идентификация по анализируемой выборке предполагаемого, в частности, нормального закона распределения с последующей оценкой его параметров (среднего и стандартного отклонения) в диапазоне их изменения от нуля до единицы. В этом случае построим для анализируемой выборки из 50 измерений с параметрами нормального распределения $a = 0{,}6$ и $s = 0{,}4$, лежащими в заданном диапазоне, эмпирические функции распределения для двух законов: предполагаемого нормального и альтернативного экспоненциального.

Фрагмент программы в кодах MATLAB с комментариями выполняемых операций на первом этапе алгоритма следующий:

```
p=0.6+0.4*randn(50,1); % анализируемая выборка
cdfplot(data) % эмпирическая функция распределения данных
Mp=mean(p)        % выборочное среднее
Sp=std(p)     % выборочное отклонение
pmax=max(p);
pmin=min(p);
dp=(pmax-pmin)/150
pt=pmin:dp:pmax;
Fn=normcdf(pt,Mp,Sp); % теоретическая функция нормального распределе-
ния
Fe=expcdf(pt,Mp,Sp);% теоретическая функция экспоненциального распре-
деления
cdfplot(p) % Графики эмпирической и теоретиеских функций распределения
plot(pt,normcdf(pt,Mp,Sp),'b*',pt,expcdf(pt,Mp,Sp),'r*'),grid
```

По результатам компьютерного моделирования получены численные значения выборочных параметров среднего и стандартного отклонений:

```
Mp =
    0.6019

Sp =
    0.4194
```

построены (рис. 1) графики выборочного (эмпирического) распределения данных, а также теоретических функций нормального и экспоненциального законов.

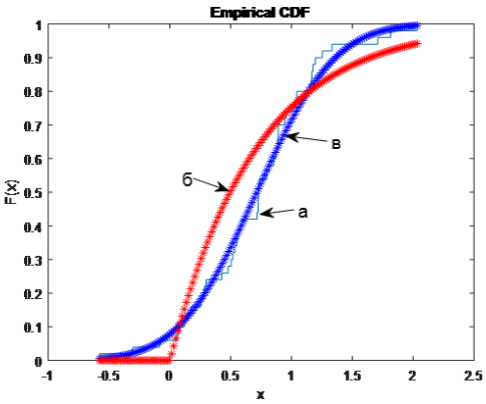


Рис. 1. Графики выборочного распределения данных *а*,
теоретических функций экспоненциального *б* и нормального *в* распределений
Fig. 1. Plots of the sample data distribution (a), theoretical exponential distribution function (b),
and theoretical normal distribution function (c)

Как следует из построенных графиков, наилучшей аппроксимацией дискретной функции распределения данных является функция распределения по нормальному закону. Следующим шагом будет подтверждение этого вывода по критерию согласия Колмогорова.

На втором этапе выполним проверку нулевой гипотезы H_0 о принадлежности анализируемой выборки предполагаемому нормальному закону распределения по критерию согласия. С этой целью используем функцию *kstest*(*p*, *cdf*, 0.05, 0) из инструментария MATLAB, которая возвращает критическое значение тестового резюме на гипотезу по Колмогорову – Смирнову. Аргументами этой функции служат случайная выборка *p*, эмпирическая функция распределения *cdf*, уровень значимости 0,05, тип гипотезы (0 — нулевая). Приведем фрагмент программы тестирования выборочного распределения на соответствие его показательному exp и нормальному norm распределениям:

```
% Проверка показательного распределения
CDFexp=[];
CDFexp(:,1)=p;
CDFexp(:,2)=cdf('exp',p,Sp);
[hKolm2,pexp,kKolm2,cKOlm2]=kstest(p,CDFexp,0.05,0);
fprintf('Критический уровень значимости для показательного распределе-
ния')
disp(pexp)
%Проверка нормального распределения
CDFexp=[];
CDFexp(:,1)=p;
CDFexp(:,2)=cdf('norm',p,Mp,Sp);
[hKolm2,pexp,kKolm1,cKolm1]=kstest(p,CDFexp,0.05,0);
fprintf('Критический уровень значимости для нормального распределе-
ния')
disp(pexp)
```

По результатам компьютерного тестирования получены решения и следующие значения критических уровней значимости для каждого из проверяемых законов распределения:

```
>>
Критический уровень значимости для показательного распределения
6.5279e-10
Критический уровень значимости для нормального распределения    0.9888
```

Таким образом, подтверждена нулевая гипотеза о принадлежности анализируемой выборки данных нормальному закону распределения. Нерешенной осталась задача параметрической оценки нормального закона распределения, т. е. получения значений среднего и стандартного отклонения. Решим данную задачу путем регрессионной обработки сгенерированной выборки p с применением нейронных сетей [14]. С этой целью необходимо построить такую нейронную сеть, чтобы при вводе массива значений функции, соответствующей нормальному закону:

$$y = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{(x-a)^2}{2s^2}\right)} \tag{6}$$

на входы сети на выходах получались искомые значения параметров: среднего a и стандартного отклонения s. В качестве значений y будем использовать псевдослучайные значения, полученные из стандартного нормального распределения с помощью ранее рассмотренной функции *randn*. Построение такой сети требует выполнения определенного порядка действий, включающих подготовку данных для обучения сети, выбор ее архитектуры, обучение и тестирование сети, а также применение ее по назначению.

Рассмотрим каждую операцию. последовательно.

1. Подготовка данных включает выбор размерности N входного массива P из значений функции y и формирование массива T из входных векторов по каждому набору параметров a и s функции (6), представляющих собой векторы-эталоны для соответствующего набора.

Выбор размерности входного массива P данных определяется размерностью анализируемой выборки: вектора-столбца из 50 строк. Формирование входного массива P и векторов-эталонов массива T производится путем генерации случайным образом компонент a и s в диапазоне (0,1, …, 1) и последующего вычисления значений функции (6), из которых состоит массив P. Циклически выполнив эту процедуру M раз, получим матрицу P размером $N \times M$ и массив векторов-эталонов размерностью $2 \times M$, которые будут использоваться для обучения сети. Чтобы процесс обучения не занимал много времени, достаточно числа повторений $M = 100$.

Фрагмент программы формирования входного и эталонного массива:

```
% Формирование массивов: входа P и эталона T
P=zeros(100,50);
T=zeros(2,100);
for i=1:100
a=0.9*rand+0.1;
s=0.9*rand+0.1;
T(1,i)=a;
T(2,i)=s;
P(i,:)=a+s.*randn(50,1);
end;
P=P'
```

Результатом реализации данного фрагмента будут матрица T из двух строк и 100 эталонных векторов-столбцов, сформированных для двух параметров a и s, а также матрица P, состоящая из 50 строк нормально распределенных псевдослучайных значений функции *randn* и 100 векторов столбцов, соответствующих параметрам a и s, состоящих из равномерно распределенных псевдослучайных значений функции *rand*. Причем компоненты как входных, так и эталонных векторов будут обновляться при каждом запуске программы.

2. Выбор архитектуры нейросети. Из множества вариантов архитектуры нейронных сетей отдано предпочтение широко используемой конфигурации на основе многослойных нейронных сетей прямого распространения *feedforward network*, поскольку она применяется с алгоритмом обратного распространения ошибки для обучения этих сетей. Такой алгоритм обеспечивает

минимизацию ошибки за счет коррекции весов сети в направлении, обратном градиенту этой ошибки, что является несомненным его достоинством. В связи с этим нейронные сети с алгоритмом обратного распространения, реализуемые в MATLAB функцией *newff*, широко используются для решения задач распознавания образов и анализа данных.

Зададимся параметрами выбранной конфигурации сети. С этой целью остановимся на двухслойной сети, состоящей из 50 нейронов во входном слое (согласно числу компонент входного вектора *P*), с тангенциально-сигмоидной функцией активации (tansig), 15 нейронов во втором (скрытом) слое с той же функцией активации и двух нейронов в выходном слое (по числу выходных параметров) с функцией активации purelin. Для обучения сети предложен алгоритм *Levenberg – Marquardt* (trainlm), обеспечивающий быстрое обучение. Тогда, согласно синтаксису функции *newff*, сеть может быть построена при следующем ее описании:

```
>> net=newff(minmax(P),[50,15,2],{'tansig' 'tansig'
'purelin'},'trainlm');
```

Здесь с помощью процедуры *minmax* вычисляется первый аргумент функции *newff*, который представляет массив из $M \times 2$ минимальных и максимальных значений элементов входных векторов. После запуска процедуры *newff* будет построена нейронная сеть *net* заданной конфигурации (рис. 2).

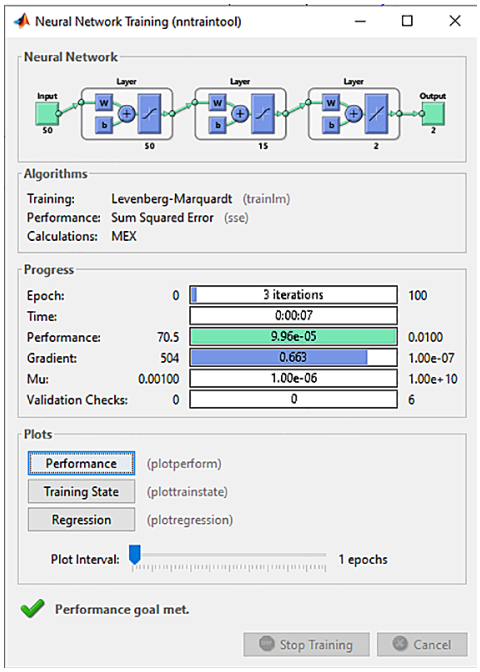


Рис. 2. Окно конфигурации нейросети
с заданными параметрами обучения
Fig. 2. Neural network configuration window with specified training parameters

3. Обучение сети. Сначала задаем параметры обучения (*train*), основными из которых являются следующие:

– функция оценки функционирования *sse*, определяемая суммой квадратичных отклонений выходов сети от эталонных значений:

– критерий окончания обучения, определяемый численным значением отклонения, например 0,01, при котором обучение завершается;

– количество циклов (*epochs*) обучения, после которого оно завершается.

Совокупность операторов, задающих параметры обучения:

```
>> net.performFcn='sse';
>> net.trainParam.goal=0.001;
>> net.trainParam.epochs=100;
```

Процесс обучения нейросети запускается со следующей строки программы:

```
>> [net,tr]=train(net,P,T);
```

Параметры обучения показаны на рис. 2, а график зависимости оценки функционирования от номера цикла обучения представлен на рис. 3.

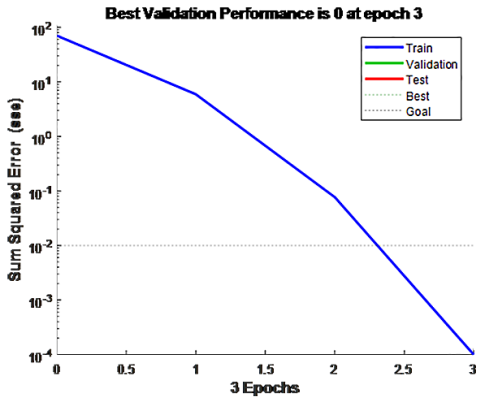


Рис. 3. Зависимость оценки функционирования от номера цикла обучения
Fig. 3. Performance function versus training epoch

На этом процесс обучения завершается и можно приступить к процессу тестирования сети.

4. Тестирование сети служит для проверки степени достоверности результатов вычислений на тестовом массиве входных векторов.

Достоверность результатов вычислений на выходе сети можно оценить с помощью функции регрессионного анализа *postreg* среды MATLAB, когда на вход сети подан тестовый массив из эталонных векторов *P*. С этой целью используется следующая процедура:

```
% регрессионный анализ результатов обработки
>> y=sim(net,P);
[m,b,r]=postreg(y(1,:),T(1,:));
figure
[m,b,r]=postreg(y(2,:),T(2,:));
figure
```

Для сравнения значений каждой из компонент (*a* и *s*) эталонных векторов *T* с соответствующими компонентами выходных векторов *Y* нейросети построены графики, представленные на рис. 4.

а) б)

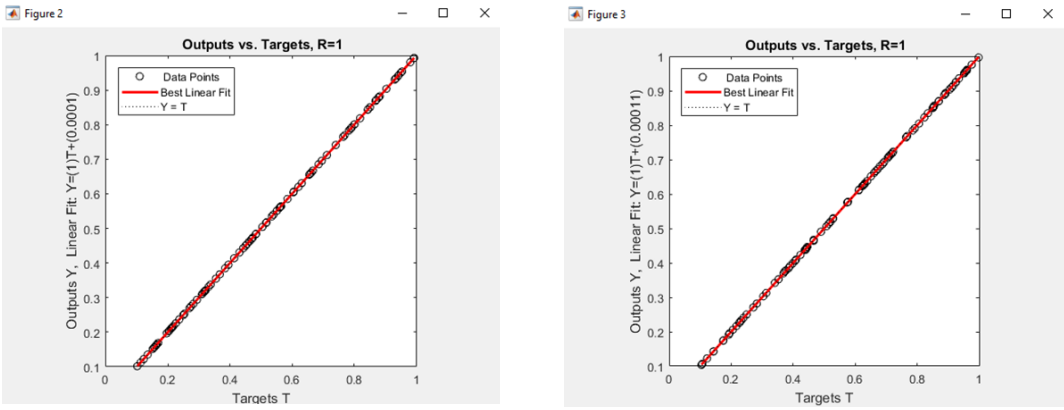


Рис. 4. Графики сравнения: *а* — параметра *a* выходного вектора с параметром *a* эталонного вектора; *б* — параметра *s* выходного вектора с параметром *s* эталонного вектора
Fig. 4. Comparison plots: a — parameter a of the output vector versus parameter a of the target vector; b — parameter s of the output vector versus parameter s of the target vector

Как видно из графиков нейросетевой аппроксимации, приведенных на рис. 4, все интерполяционные точки из эталонных массивов параметров *a* и *s* находятся на прямых, соответствующих лучшей линейной подгонки этих параметров, что свидетельствует о достоверности параметрического сравнения и правильной работе сети на тестовом массиве.

5. Применение сети по назначению. После того как сеть обучена для распознавания выборок псевдослучайных данных, распределенных по нормальному закону с вариацией его параметров *a* и *s* в диапазоне от 0 до 1, она готова к параметрической оценке анализируемой выборки $p = 0.6+0.4*randn(50,1)$, полученной еще на первом этапе решения задачи идентификации модели. С этой целью воспользуемся снова функцией *sim*, но вторым аргументом вместо вектора *P* эталонных сигналов подставим в нее вектор *p* анализируемой выборки:

$$Y = sim(net, p),$$

где *Y* — результат анализа в виде выходного вектора искомых параметров *a* и *s*.

Данная функция может использоваться и для визуальной оценки по графикам выхода модели объекта. Для количественной оценки следует найти разность векторов и для вектора ошибки определить эвклидову норму либо воспользоваться квадратичной формой оценки по интегральному критерию качества.

Результаты (Results)

По результатам параметрической идентификации анализируемой выборки данных с помощью обученной нейросети получим параметры конфигурации самой сети и численные значения оценок параметров среднего a_1 и стандартного отклонения s_1:

```
net =
    Neural Network
              name: 'Custom Neural Network'
          userdata: (your custom info)

    dimensions:
          numInputs: 1
         numLayers: 3
        numOutputs: 1
    numInputDelays: 0
    numLayerDelays: 0
 numFeedbackDelays: 0
 numWeightElements: 3347
        sampleTime: 1

Y =
    0.6198
    0.4269

a1 =
    0.6198

s1 =
    0.4269
>>
```

Для визуального отображения и сравнения законов (интегрального и дифференциального) нормального распределения — как с параметрами *Mp* и *Sp* анализируемой выборки, так и с их регрессионными оценками, полученными с помощью обученной нейросети, построены графики, приведенные на рис. 5.

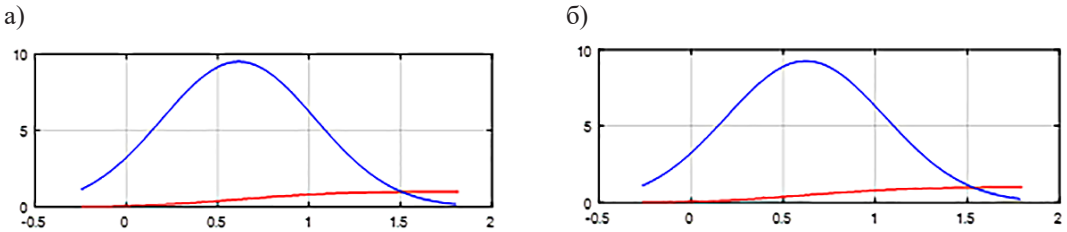


Рис. 5. Графики функции и плотности нормального распределения выборок: анализируемой (*а*) и ее нейросетевой моделей *б*)
Fig. 5. Plots of the normal distribution function and density for the analyzed sample (a) and its neural-network model (b)

При этом сумма квадратов отклонений, определяемая евклидовым расстоянием между координатами входных векторов по формуле

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{n=10} \left\| G_i - G_m \right\|^2}, \tag{7}$$

составила evcm = 3,2394.

Как видно из полученных результатов, вычисленные оценки среднего a_1 = 0,6198 и стандартного отклонения s_1 = 0,4269 соответствуют исходным параметрам a = 0,6 и s = 0,4 проверяемой выборки, а также ее выборочным значениям Mp = 0,6019 и Sp = 0,4194 с точностью до малых значений.

Из результатов сравнения полученных графиков функций и плотности распределения по нормальному закону для выборочной (проверяемой) и ее нейросетевой моделей данных измерений можно судить о достоверности разработанного алгоритма идентификации законов распределения выборочных данных и адекватности нейросетевой модели их параметрической оценки.

Результаты численного и компьютерного моделирования процессов идентификации моделей распределения данных по критерию Колмогорова и их параметрической оценки с применением нейронных сетей свидетельствуют о полной автоматизации проверки нулевой гипотезы и подтверждают адекватность и работоспособность алгоритма автоматизации и его точность.

Заключение (Conclusion)

В работе приведены результаты исследований, связанные с компьютерным моделированием, идентификацией и практической реализацией нейросетевого алгоритма автоматизации проверки статистических сложных гипотез по критерию согласия Колмогорова. Корректность и реализуемость предлагаемых технических решений подтверждена на примере эксперимента, состоящего из двух этапов проверки, генерируемой по псевдослучайному закону выборки данных измерений о нормальном распределении. Вычисленные оценки с учетом заданного уровня значимости по критерию Колмогорова полностью соответствуют ожидаемым результатам.

Предложенный алгоритм автоматизации и численного моделирования процессов проверки статистических гипотез с применением нейросетей и средств MATLAB позволяет принимать обоснованные решения при обработке данных в системах автоматизированного управления и измерения на объектах водного транспорта. Кроме того, предложенные решения служат дальнейшей цифровизации процессов регрессионной оценки параметров с применением нейросетевых алгоритмов идентификации процедур проверки статистических гипотез по различным критериям согласия в высокотехнологичных программно-измерительных комплексах автоматизированных систем управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бахрушин В. Е.* Проблемы идентификации моделей распределения случайных величин с применением современного программного обеспечения / В. Е. Бахрушин // Успехи современного естествознания. — 2011. — № 11. — С. 50–54. EDN OWBHQT.

2. К вопросу планирования объема испытаний образцов новой техники. / А. В. Антонов, В. А. Чепурко, В. Е. Чехович, В. Ф. Украинцев // Надежность. — 2016. — Т. 16. — № 3. — С. 3–7. DOI: 10.21683/1729-2646-2016-16-3-3-7.

3. *Лемешко Б. Ю.* Сравнительный анализ мощности критериев согласия при близких конкурирующих гипотезах. I. Проверка простых гипотез / Б. Ю. Лемешко, С. Б. Лемешко, С. Н. Постовалов // Сибирский журнал индустриальной математики. — 2008. — Т. 11. — № 2(34). — С. 96–111. EDN HXINXT.

4. Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход / Б. Ю. Лемешко, С. Б. Лемешко, С. Н. Постовалов, Е. В. Чимитова. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2011. — 888 с. EDN TZNHMX.

5. *Полосин В. Г.* Энтропийно-параметрический критерий для проверки статистических гипотез в системах управления и обработки информации / В. Г. Полосин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. — 2021. — № 4(60). — С. 55–68. EDN ZIICUH. DOI: 10.21685/2072-3059-2021-4-5.

6. *Орлов А. И.* Современное состояние непараметрической статистики / А. И. Орлов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. — 2015. — № 106. — С. 239–269. EDN TKLWHF.

7. *Tsybakov A. B.* Introduction to nonparametric estimation / A. B. Tsybakov. Springer Science & Business Media, 2008. 224 p.

8. *Яшин А. В.* Выбор критерия согласия для определения закона распределения измеряемой величины / А. В. Яшин, Ф. И. Храпов // Измерительная техника. — 2002. — № 1. — С. 16–20.

9. *Чертков А. А.* Алгоритм автоматизации метода проверки статистических гипотез по критерию Пирсона средствами MATLAB / А. А. Чертков // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 513–523. EDN NVLTAM. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-513-523.

10. *Воробьев Р. И.* Исследование статистических критериев проверки гипотез для целей определения местоположения / Р. И. Воробьев, А. С. Брагин // Экономика и качество систем связи. — 2022. — № 3(25). — С. 67–74. EDN RQCARP.

11. *Лапчик М. П.* Численные методы / М. П. Лапчик, М. И. Рагулина, Е. К. Хеннер. — М. : ИЦ «Академия», 2007. — 384 с.

12. *Тырсин А. Н.* Оценивание линейной регрессии на основе обобщенного метода наименьших модулей / А. Н. Тырсин, Л. А. Соколов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. — 2010. — № 5(21). — С. 134–142. EDN NCTNLB.

13. *Ануфриев И. Е.* MATLAB 7. Наиболее полное руководство в подлиннике / И. Е. Ануфриев, А. Б. Смирнов, Е. Н. Смирнова. — СПб. : БХВ-Петербург, 2005. — 1104 с.

14. *Медведев В. С.* Нейронные сети. MATLAB 6 / В. С. Медведев, В. Г. Потемкин. М. : ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. — 496 с.

REFERENCES

1. Bakhrushin, V. E. "Problemy identifikatsii modeley raspredeleniya sluchaynykh velichin s primeneniem sovremennogo programmnogo obespecheniya." *Advances in Current Natural Sciences* 11 (2011): 50–54.

2. Antonov, A. V., Chepurko V. A., Chekhovich V. E. and Ukraintsev V. F. "Regarding the planning of testing scope for new equipment samples." *Dependability* 16.3 (2016): 3–7. DOI: 10.21683/1729-2646-2016-16-3-3-7.

3. Lemeshko, B. Yu., S. B. Lemeshko and S. N. Postovalov. "Sravnitel'nyy analiz moschnosti kriteriev soglasiya pri blizkikh konkuriruyuschikh gipotezakh. I. Proverka prostykh gipotez." *Sibirskii Zhurnal Industrial'Noi Matematiki* 11.2(34) (2008): 96–111.

4. Lemeshko, B. Yu., S. B. Lemeshko, S. N. Postovalov and E. V. Chimitova. *Statistical data analysis, simulation and study of probability regularities. computer approach.* Novosibirsk: Novosibirskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 2011: 888.

5. Polosin, V. G. "Entropy-parametric criterion for testing statistical hypotheses in control systems and information processing." *University Proceedings. Volga Region. Technical Sciences* 4(60) (2021): 55–68. DOI: 10.21685/2072-3059-2021-4-5.

6. Orlov, A. I. "Current status of nonparametric statistics." *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University* 106 (2015): 239–269.

7. Tsybakov, A. B. *Introduction to nonparametric estimation.* Springer Science & Business Media, 2008: 224.

8. Yashin, A. V. and F. I. Khrapov. "Vybor kriteriya soglasiya dlya opredeleniya zakona raspredeleniya izmeryaemoy velichiny." *Izmeritel'naya tekhnika* 1 (2002): 16–20.

9. Chertkov, A. A. "Algorithm for automation of the method of testing statistical hypotheses according to the pearson criterion by the means of matlab." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 15.3 (2023): 513–523. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-513-523.

10. Vorobyov R. I., A. S. Bragin "Study of statistical criteria for testing hypotheses for location purposes." *Ekonomika i kachestvo system svyazi*. – 3(2022): 67–74.

11. Lapchik, M. P., M. I. Ragulina, and E. K. Khenner. Chislennye metody. M.: Iz-datel'skii tsentr «Akademiya», 2007.

12. Tyrsin, A. N. and L. A. Sokolov. "The estimation of linear regression is based on the generalized least modules method." *Journal of Samara State Technical University. Ser. Physical and Mathematical Sciences* 5(21) (2010): 134–142.

13. Anufriev, I. E., A. B. Smirnov and E. N. Smirnova. *MATLAB 7. Naibolee polnoe rukovodstvo v podlinnike.* SPb.: BKhV-Peterburg, 2005: 1104.

14. Medvedev, V. S. and V. G. Potemkin. *Neyronnye seti. MATLAB 6.* M.: DIALOG-MIFI, 2002: 496.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Барышников Сергей Олегович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *BarychnikovSO@gumrf.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, kaf_electroprivod@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, kaf_electricautomatic@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Baryshnikov, Sergey O. —
Doctor of Technical Sciences, Professor
Admiral Makarov State University of Martime and Inland Shipping
5/7, Dvinskaya Str., St. Petersburg,
198035, Russian Federation
e-mail: *BarychnikovSO@gumrf.ru*

Chertkov, Alexander A. —
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7, Dvinskaya Str., St. Petersburg,
198035, Russian Federation
e-mail: *chertkov51@mail.ru, kaf_electroprivod@gumrf.ru*

Kask, Yaroslav N. —
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Admiral Makarov State University of Martime and Inland Shipping
5/7, Dvinskaya Str., St. Petersburg,
198035, Russian Federation
e-mail: *rgam2010@yandex.ru, kaf_electricautomatic@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию: 26 января 2026 г.
Received: Jan. 26, 2026.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-538-557 **EDN ZVQCVX**

УДК: 303.732.4

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ДИАЛОГОВОГО АССИСТЕНТА С ДИНАМИЧЕСКИМ ВЫБОРОМ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ И МЕХАНИЗМОМ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗНАНИЙ

Н. А. Полковникова

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

Статья посвящена разработке интеллектуального диалогового ассистента для поддержки пользователей при получении и уточнении расписания учебных занятий. Рассмотрена эволюция диалоговых систем — от ранних правило-ориентированных текстовых диалоговых программ, основанных на шаблонном сопоставлении входных высказываний до современных виртуальных ассистентов, реализованных на основе нейросетевых трансформерных архитектур и больших языковых моделей. Актуальность исследования обусловлена применением больших языковых моделей в сочетании с технологией извлечения контекстных знаний (Retrieval-Augmented Generation, RAG), позволяющей формировать ответы на основе извлекаемой из внешних источников информации. Разработана архитектура интеллектуального диалогового ассистента, интегрирующая механизм RAG, динамическую маршрутизацию между несколькими нейросетевыми языковыми моделями и автоматическое обновление базы знаний посредством парсинга веб-ресурсов Государственного морского университета имени адмирала Ф. Ф. Ушакова. Предложенный подход обеспечивает устойчивую обработку вариативных пользовательских запросов и генерацию ответов на основе извлеченного контекста. В отличие от существующих решений, использующих фиксированную языковую модель, предложенная архитектура реализует адаптивный выбор генеративной модели в зависимости от типа пользовательского запроса. Разработан метод доменно-ориентированного формирования контекста для обработки динамически обновляемых табличных данных расписания, включающий специализированный парсинг веб-страниц, семантическое структурирование извлекаемой информации и правила промпт-инжиниринга. Для повышения фактологической достоверности ответов предложен механизм ограничения генерации рамками извлеченных данных и терминологической фильтрации. Реализован ETL-конвейер обновления базы знаний, обеспечивающий автоматическую актуализацию информации о расписании учебных занятий. Проведено сравнительное исследование эффективности языковых моделей Qwen, GigaChat и DeepSeek при обработке пользовательских запросов в рассматриваемом предметном домене. Полученные результаты демонстрируют повышение точности ответов и подтверждают эффективность предложенной архитектуры диалогового ассистента.

Ключевые слова: диалоговый ассистент, чат-бот, виртуальный цифровой ассистент, большая языковая модель, нейросетевой трансформер, механизм извлечения знаний, извлечение контекстных знаний.

Для цитирования:
Полковникова Н. А. Разработка интеллектуального диалогового ассистента с динамическим выбором нейросетевых языковых моделей и механизмом извлечения знаний / Н. А. Полковникова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 3. С. 538–557. EDN ZVQCVX. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-538-557.

DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT CONVERSATIONAL ASSISTANT WITH DYNAMIC SELECTION OF NEURAL LANGUAGE MODELS AND A KNOWLEDGE RETRIEVAL MECHANISM

N. A. Polkovnikova

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

This paper presents the development of an intelligent conversational assistant designed to support users in obtaining and clarifying information about university class schedules. The evolution of dialogue systems

is considered, from early rule-based text dialogue programs based on pattern matching of input utterances to modern virtual assistants implemented using neural transformer architectures and large language models. The relevance of the study is determined by the use of large language models in combination with Retrieval-Augmented Generation (RAG), which makes it possible to generate responses based on information retrieved from external sources. An architecture of an intelligent conversational assistant has been developed that integrates a RAG mechanism, dynamic routing between several neural language models, and automatic updating of the knowledge base through parsing Admiral F. F. Ushakov State Maritime University web resources. The proposed approach ensures robust processing of variable user queries and response generation based on the retrieved context. Unlike existing solutions that rely on a fixed language model, the proposed architecture implements adaptive selection of a generative model depending on the type of user query. A method for domain-oriented context construction for processing dynamically updated tabular schedule data has been developed, including specialized web page parsing, semantic structuring of the extracted information, and prompt engineering rules. To improve the factual reliability of responses, a mechanism is proposed that constrains generation to the retrieved data and applies terminological filtering. An ETL pipeline for updating the knowledge base has been implemented, enabling automatic updating of information about university class schedules. A comparative study of the effectiveness of the Qwen, GigaChat, and DeepSeek language models in processing user queries within the considered subject domain has been conducted. The obtained results demonstrate improved response accuracy and confirm the effectiveness of the proposed conversational assistant architecture.

Keywords: conversational assistant; chatbot; virtual digital assistant; large language model; neural transformer architecture; knowledge retrieval mechanism; retrieval-augmented generation.

For citation:
Polkovnikova, Natalia A. "Development of an intelligent conversational assistant with dynamic selection of neural language models and a knowledge retrieval mechanism." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.3 (2026): 538–557. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-3-538-557.

Введение (Introduction)

Актуальность исследования обусловлена фундаментальным сдвигом в парадигме цифровых коммуникаций: переход от жестко детерминированных алгоритмов к адаптивным диалоговым интерфейсам становится ключевым вектором развития интеллектуальных диалоговых систем. В настоящее время диалоговые системы трансформируются в полноценных интеллектуальных ассистентов, интегрируемых в критически важные бизнес-процессы. Вместе с тем задача разработки эффективных, эмпатичных и одновременно точных, контекстно-ориентированных, фактологически достоверных виртуальных цифровых ассистентов остается далекой от окончательного решения. В частности, распространенной проблемой является снижение качества обработки пользовательских обращений при отклонении формулировок от предусмотренных шаблонов и сценариев.

На современном этапе развития технологий искусственного интеллекта наблюдается противоречие между высокими когнитивными способностями больших языковых моделей (англ. Large Language Models (LLM)) и требованиями к фактической точности ответов в предметных областях с динамически обновляемыми данными [1–5]. Несмотря на значительный прогресс больших языковых моделей, их практическое применение в специализированных предметных областях ограничивается феноменом генерации недостоверной информации (англ. Hallucination), отсутствием механизмов оперативного доступа к актуальным данным и высокой зависимостью качества ответа от формулировки пользовательского запроса.

Указанные ограничения препятствуют использованию автономных LLM в задачах информационного сопровождения образовательных процессов и требуют разработки новых архитектурных подходов к обеспечению фактологической достоверности генерируемых ответов. В этом контексте особую значимость приобретает разработка диалоговых ассистентов на базе гибридной архитектуры, объединяющих генеративный потенциал нейросетевых трансформеров с технологиями семантического поиска и извлечения контекста (англ. Retrieval-Augmented Generation (RAG)).

Особую актуальность данная задача приобретает в образовательной сфере, где пользователям требуется оперативный доступ к постоянно обновляемой информации о расписании занятий, аудиториях, преподавателях и изменениях учебного процесса. Использование традиционных

чат-ботов в образовательной сфере затрудняет обработку запросов, сформулированных в произвольной форме, что снижает удобство взаимодействия пользователей с информационными системами.

Архитектуры RAG позволяют повысить актуальность и фактологическую достоверность ответов, однако эффективность таких систем в существенной степени зависит от характеристик используемой языковой модели и вычислительных ресурсов, необходимых для генерации ответа. Дополнительный интерес представляет применение механизмов динамического выбора языковых моделей, позволяющих адаптировать вычислительные ресурсы системы к сложности пользовательского запроса, обеспечивая баланс между качеством ответа, временем отклика и вычислительными затратами.

Целью работы является повышение фактологической достоверности и актуальности ответов интеллектуальных диалоговых систем посредством разработки и реализации гибридного диалогового ассистента на основе механизма извлечения контекстных знаний и динамического выбора языковых моделей, для поддержки пользователей в предметной области расписания учебных занятий.

Для достижения поставленной цели предложена архитектура интеллектуального диалогового ассистента, объединяющая механизм извлечения контекстных знаний и модуль динамического выбора языковых моделей. Эффективность предложенного решения подтверждена результатами экспериментальной оценки данных предметной области расписания учебных занятий.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для реализации диалогового ассистента и обоснованного выбора технических средств и подходов выполнен анализ эволюции диалоговых систем: отправной точкой развития принято считать работу А. М. Тьюринга «Computing Machinery and Intelligence» (1950 г.), в которой был предложен тест, оценивающий способность машины имитировать человеческий диалог. В 1960-е гг. появились первые прототипы текстовых собеседников ELIZA Дж. Вейценбаума (1966 г.) и PARRY К. Колби (1972 г.), основанные на правилах и шаблонах. Эти системы демонстрировали принципиальную техническую возможность имитации диалога, но оставались жестко сценарными и крайне ограниченными по лингвистическому и предметному охвату. В 1980–1990-е гг. получили распространение правило- и скриптово-ориентированные чат-боты (например, A.L.I.C.E. Р. Уоллеса, 1995 г.), использующие языки шаблонов и иерархии правил. Они легли в основу многих ранних коммерческих решений, но масштабирование таких систем требовало ручной разработки большого числа правил, а гибкость и «естественность» диалога оставались низкими. На этом этапе чат-боты рассматривались преимущественно как вспомогательные интерфейсы к простым сервисам. С начала 2000-х гг. под влиянием развития статистического обучения и обработки естественного языка диалоговые системы эволюционируют в сторону так называемых «конвейерных» (pipeline) архитектур: с модулями понимания намерений (Intent Recognition), извлечения сущностей (NER) и управления диалогом.

Появление голосовых ассистентов (Apple Siri с 2011 г., а затем Amazon Alexa, Google Assistant) делает диалоговые интерфейсы массовыми, но они по-прежнему жестко связаны с заранее определенным набором сценариев и намерений, а расширение функционала требует значительных инженерных усилий. На рис. 1 представлена структурная схема эволюции диалоговых ассистентов (чат-ботов) за период 1950–2026 гг.: от продукционных правил до больших языковых моделей и мультимодальных агентов. На схеме выделены следующие этапы: эра правил и ранних концепций (1950–1979 гг.), эра статистических моделей и экспертных систем (1980–2009 гг.), эра глубокого обучения и нейросетевых подходов (2010–2018 гг.), а также эра больших языковых моделей (LLM) и мультимодальности (2019–2026 гг.).

Фундаментальный сдвиг в развитии технологий диалоговых ассистентов связан с внедрением глубоких нейронных сетей, в частности архитектуры Sequence-to-Sequence (seq2seq), обеспечившей возможность прямой генерации ответов в виде связных лексических последовательностей (последовательности слов). Однако первые нейросетевые диалоговые модели имели ограниченный контекст, тривиальные ответы и были пригодны преимущественно для исследовательских прототипов. В 2017 г. произошел фазовый сдвиг с появлением нейросетевой архитектуры трансформера

и парадигмы предобученных языковых моделей большого масштаба. В 2018 г. появились модели BERT, GPT-1, а затем GPT-2 и GPT-3 было продемонстрировано, что единая модель предобученная на больших объемах данных (Common Crawl, The Pile, RedPajama, FineWeb и др.) способна решать широкий спектр языковых задач без специализированного обучения для каждой задачи [6–9].

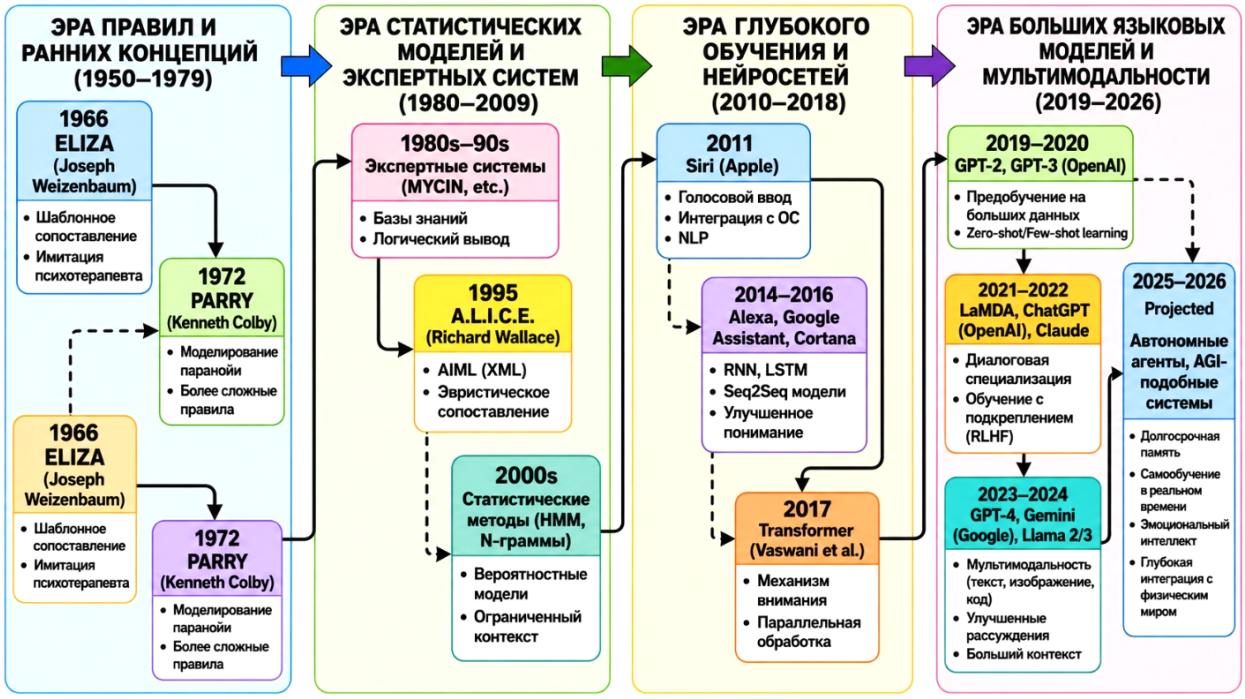


Рис. 1. Эволюция диалоговых ассистентов
Fig. 1. Evolution of Conversational Assistants

Появление в 2022 г. нейросетевой архитектуры GPT-3.5 с использованием обучения с подкреплением на основе обратной связи человека (RLHF — Reinforcement learning from human feedback) инициировало процесс массового внедрения LLM-чат-ботов: диалоговые системы превратились из вспомогательного сервиса в универсальный интерфейс доступа к знаниям и цифровым услугам.

Выход моделей нового поколения (GPT-4, Claude 3, Gemini, Llama-3 и др.) закрепил эту тенденцию, обеспечив многомодальность, поддержку длинного контекста, сложные рассуждения и адаптацию к прикладным доменам [10, 11]. В 2025–2026 гг. диалоговые ассистенты трансформируются в автономных агентов с элементами AGI (Artificial General Intelligence — общий искусственный интеллект) — ассистентов с интеллектом уровня человека.

Автономные агенты — это программные системы, способные самостоятельно ставить цели и выполнять задачи без постоянного контроля со стороны человека [12–16]. Развитие таких технологий направлено на создание AGI-подобных систем, которые стремятся к универсальности человеческого мышления и умению решать нестандартные задачи в условиях неопределенности. Ключевым компонентом их архитектуры является долгосрочная память, позволяющая сохранять опыт и контекст диалогов за пределами текущей сессии. Эффективность работы повышается за счет самообучения в реальном времени, когда система адаптируется к новым данным «на лету», не требуя полной перетренировки. Дополняет этот набор эмоциональный интеллект, обеспечивающий способность агента распознавать настроение пользователя и выстраивать эмпатичное взаимодействие.

Таким образом, за семь десятилетий развития чат-боты прошли путь от простых шаблонных программ до универсальных нейросетевых ассистентов на базе больших языковых моделей, способных вести многоходовой диалог, решать сложные когнитивные задачи и интегрироваться в критически важные информационные системы.

Большие языковые модели (LLM) — это нейросетевые модели обработки естественного языка, которые обучаются на очень больших корпусах текстов и затем способны генерировать связный текст, отвечать на вопросы, суммировать, переводить, извлекать информацию и выполнять другие языковые задачи. Обычно это крупные трансформерные модели, дополнительно дообученные под диалог и инструкции Instruction Tuning, RLHF и др.).

В основу современных LLM заложена нейросетевая архитектура трансформер (англ. Transformer). В отличие от рекуррентных нейросетевых архитектур (RNN, LSTM, GRU), трансформеры не имеют рекуррентных слоев, они заменены на механизм внимания (self-attention). Поэтому нейросетевые трансформеры не требуют строго последовательного прохождения по токенам при обучении, что обеспечивает высокую степень параллелизма вычислений. Параллельная обработка последовательностей делает возможным обучение моделей на значительно больших объемах данных и с существенно большим числом параметров при использовании современных GPU/TPU-кластеров [17–22]. Таким образом, применение нейросетевых трансформерных архитектур для больших языковых моделей позволяет получать следующие результаты:

– параллелизация обучения (существенное ускорение по сравнению с LSTM-архитектурой);
– эффективная обработка длинных контекстов;
– масштабируемость при увеличении объема обучающих данных и числа параметров модели.

В совокупности указанные свойства представляют собой ключевое архитектурное достижение, во многом определившее появление и практическую реализуемость современных больших языковых моделей. Фактически данный переход стал фундаментальным этапом развития, без которого широкое распространение LLM в их текущем виде было бы затруднено. Трансформерные языковые модели демонстрируют устойчивый рост качества по мере увеличения масштаба модели, данных и вычислений, что подтверждается эмпирическими закономерностями масштабирования. Масштабирование, в свою очередь, способствует формированию более универсальных языковых представлений и улучшению переноса на различные прикладные задачи [23–26].

В принципе, языковая модель большого масштаба может быть реализована и на альтернативных архитектурах, однако на текущем этапе именно трансформеры обеспечивают наиболее выгодный компромисс между качеством, устойчивостью обучения и вычислительной эффективностью. Кроме того, трансформеры хорошо интегрируются с методами последующей настройки под инструкции и диалоговые сценарии, что повышает их практическую ценность для построения ассистентов. По этой причине большинство современных диалоговых ассистентов, ориентированных на открытые формулировки запросов, опираются на трансформерные большие языковые модели как на базовый компонент. Таким образом, распространенность трансформеров в роли основы для больших языковых моделей объясняется не терминологическим определением, а совокупностью архитектурных, вычислительных и инженерных преимуществ, проявляющихся при обучении и применении моделей в крупном масштабе.

Большие языковые модели (LLM) радикально изменили парадигму человеко-машинного взаимодействия, сделав естественный язык основным интерфейсом доступа к цифровым сервисам, корпоративным знаниям и автоматизированным процессам. Однако в реальных производственных и институциональных сценариях использование публичных LLM показало фундаментальные ограничения: фактическую недостоверность (галлюцинации), статичность встроенных знаний и отсутствие прозрачной привязки генерируемых утверждений к авторитетным источникам. Именно эти ограничения определяют научную и практическую актуальность разработки диалоговых ассистентов на базе технологии RAG-метода, объединяющего возможности больших языковых моделей с механизмами поиска информации во внешних источниках. Технология RAG была сформулирована и популяризована в 2020 г. исследователями Facebook AI Research (компания Meta, в то время Facebook).

Стандартные большие языковые модели, несмотря на свою мощь, имеют следующие фундаментальные ограничения:

– проблема устаревших знаний: LLM обучаются один раз на фиксированном наборе данных (они не знают о событиях, произошедших после завершения обучения);

– галлюцинации и фактические ошибки: если модель не знает точного ответа, она склонна генерировать правдоподобный, но ложный текст, опираясь на статистические вероятности, а не на факты;

– отсутствие доступа к закрытым данным: публичные LLM не имеют доступа к корпоративным базам знаний, личным документам или закрытым исследованиям организации;

– сложность и дороговизна дообучения: постоянное переобучение огромной модели для внесения новых знаний требует колоссальных вычислительных ресурсов и времени, что экономически нецелесообразно для динамично меняющихся данных.

Технология RAG изменяет парадигму генерации ответа: вместо того чтобы полагаться исключительно на свою внутреннюю (параметрическую) память, языковая модель получает доступ к внешней (непараметрической) памяти. Процесс выглядит следующим образом:

– поиск (retrieval): система принимает запрос пользователя и сначала производит поиск релевантной информации во внешней базе данных (векторной базе, корпоративном хранилище, интернете);

– обогащение (augmentation): найденная информация (контекст) добавляется к исходному запросу пользователя;

– генерация (generation): LLM получает обогащенный запрос и генерирует ответ, используя найденные факты как первоисточник.

Совокупность указанных механизмов позволяет трансформировать LLM из системы, опирающейся исключительно на знания, полученные на этапе обучения, в интеллектуального агента, способного осуществлять поиск, анализ и обобщение актуальной информации из внешних источников. Можно выделить следующие ключевые преимущества применения технологии RAG:

1. Актуальность информации: система может отвечать на вопросы, используя данные, появившиеся секунду назад (например, биржевые сводки, последние новости, новые приказы по компании), без необходимости переобучения модели.

2. Снижение уровня галлюцинаций: поскольку модель получает инструкцию формировать ответ на основе предоставленного контекста, вероятность выдумки резко снижается; ответы становятся фактологически обоснованными.

3. Прозрачность и интерпретируемость: RAG позволяет указывать источники информации. Система может не просто дать ответ, но и сослаться на конкретный документ или абзац, что критически важно для многих сфер.

4. Безопасность данных и приватность: при обучении данные остаются в весовых коэффициентах нейросети. Корпоративные данные хранятся в защищенном внешнем контуре, и модель получает к ним доступ только в момент генерации ответа в рамках конкретной сессии.

5. Экономическая эффективность: внедрение RAG значительно дешевле, чем постоянное дообучение: легче обновить документ в базе данных, чем переобучать нейросеть с миллиардами параметров. RAG позволяет использовать сравнительно компактные модели, компенсируя ограниченность их параметрических знаний доступом к внешнему хранилищу, что уменьшает вычислительные затраты и упрощает внедрение в продуктивные системы.

6. Персонализация контекста: возможность динамически подменять базы знаний для разных пользователей или задач, используя одну и ту же базовую модель (LLM) как механизм рассуждений.

Архитектура диалогового ассистента на основе большой языковой модели с механизмом извлечения контекстных знаний (RAG) строится как конвейер, в котором генерация ответа опирается не только на «память» модели, но и на внешнюю базу документов / данных, релевантных текущему запросу. На рис. 2 представлена разработанная архитектура диалогового ассистента для поддержки пользователей при получении и уточнении расписания учебных занятий на основе большой языковой модели и механизма извлечения контекстных знаний.

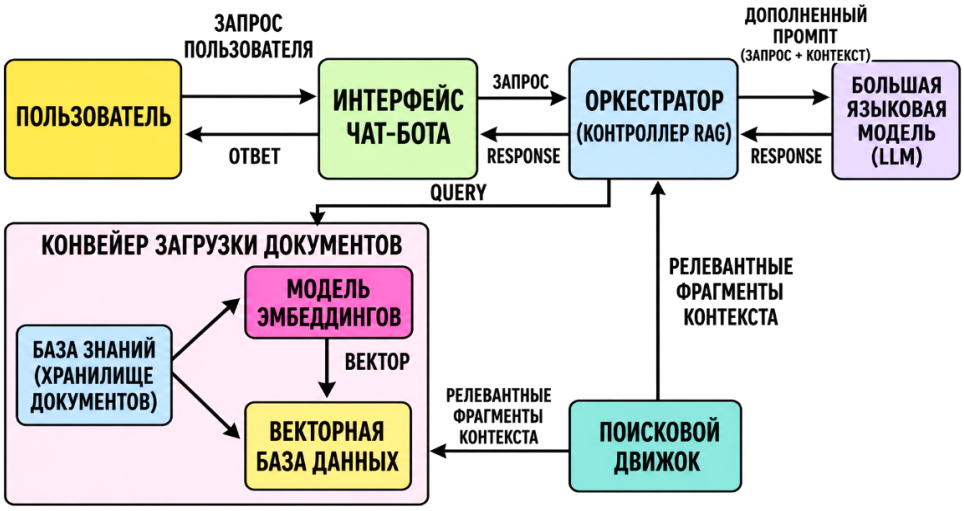


Рис. 2. Архитектура диалогового ассистента на основе большой языковой модели и механизмом извлечения контекстных знаний

Fig. 2. Architecture of a Conversational Assistant Based on an LLM and Contextual Knowledge Retrieval

Пользователь отправляет текстовый запрос через клиентский интерфейс (веб / мессенджер / приложение). Оркестратор (контроллер RAG) принимает запрос и при необходимости выполняет предобработку: очистку текста, исправление опечаток или переформулирование запроса для улучшения качества поиска. Затем оркестратор RAG определяет режим обработки запроса (маршрутизацию запроса): контур RAG или поисковый движок общей базы знаний языковой модели, используя только ее параметрическую память. Далее модуль предобработки нормализует текст, определяет язык, извлекает сущности (например, группа, преподаватель, аудитория, дата), а также формирует контекст диалога, используя хранилище истории сообщений.

На этом этапе часто выполняется классификация намерения и оценка сложности запроса, чтобы выбрать стратегию обработки: прямой ответ, вызов инструментов или запуск RAG-контура. Запрос пользователя преобразуется в поисковое представление: либо строится векторное представление (модель эмбеддингов), либо формируется текстовый поисковый запрос для полнотекстового поиска. Поисковый модуль обращается к базе знаний (хранилищу документов), которая создается из заранее заданных документов, расписаний, регламентов или FAQ. Индексация включает этапы ETL: извлечение данных, очистку, разбиение на фрагменты (chunking), генерацию эмбеддингов, добавление метаданных (источник, дата, права доступа) и сохранение в векторное хранилище / поисковый движок.

Основные компоненты диалогового ассистента на основе большой языковой модели и механизмом извлечения контекстных знаний:

1. База знаний (хранилище документов Knowledge Base): внешние документы (pdf, docx, html, текст), разбиваемые на фрагменты (chunks).

2. Эмбеддинги и векторное хранилище: текст преобразуется в числовые векторы и сохраняется в специальной базе для семантического поиска.

3. Поисковик («retriever»): при поступлении вопроса система производит поиск наиболее похожих по смыслу фрагментов в векторной базе. Основа технологии RAG — это процесс («Knowledge Retrieval») поиска и выборки релевантных фрагментов информации из большой базы данных в ответ на запрос пользователя.

4. Генератор (LLM): языковая модель получает дополненный промпт (вопрос пользователя + найденные фрагменты текста) и формирует точный ответ на основе предоставленных данных.

Большая языковая модель с механизмом извлечения контекстных знаний формализуется как композиция параметрической вероятностной модели (нейросетевого трансформера) и внешнего

стохастического оператора доступа к знаниям, где генерация текста условно зависит не только от входной последовательности, но и от извлеченного релевантного контекста из внешнего пространства знаний. Рассмотрим формализацию LLM через словарь токенов v и последовательность токенов:

$$X = (x_1, x_2, ..., x_T),\ x_t \in V, \tag{1}$$

где x_t — t-й токен в последовательности, $t \in \{1, ..., T\}$; t — индекс позиции токена в последовательности (текущий шаг генерации); T — общая длина последовательности (общее количество токенов в последовательности); v — словарь токенов (vocabulary).

Токен в LLM — это минимальная дискретная единица представления текста, с которой непосредственно работает модель; это не обязательно слово, а элемент формального алфавита модели, получаемый процедурой токенизации. Большая языковая модель (LLM) формально задает условное распределение:

$$P_\theta(x_1, \ldots, x_T) = \prod_{t=1}^{T} P_\theta(x_t \mid x_1, \ldots, x_{t-1}), \tag{2}$$

где θ — совокупность обучаемых параметров языковой модели; $P_\theta(x_t \mid x_1,\ldots, x_{t-1})$ представляет собой условное распределение вероятностей следующего токена, формируемое глубокой нейронной сетью архитектуры трансформер и аппроксимирующее статистические закономерности естественного языка.

Каждое условное распределение реализуется через скрытое представление:

$$h_t = f_\theta(x_1, \ldots, x_{t-1}),\ P_\theta(x_t \mid \cdot) = \mathrm{Softmax}(Wh_t). \tag{3}$$

При реализации механизма извлечения контекстных знаний введем внешнее пространство знаний K,

$$K = \{k_1, k_2, \ldots, k_N\}, \tag{4}$$

где каждый элемент k_i — это структурированный или неструктурированный фрагмент информации (документ, абзац, факт).

Определим отображение кодирования знаний, которое переводит знания в векторное представление (эмбеддинги):

$$\varphi : K \to \mathbb{R}^d, \tag{5}$$

где φ — функция кодирования (эмбеддинга), отображающая элемент пространства знаний K в вектор фиксированной размерности d, сохраняющий его семантическое содержание.

Далее рассмотрим механизм извлечения контекстных знаний (Retrieval). Пусть q_t — входной запрос или текущий контекст:

$$q_t = g(h_t), \tag{6}$$

где g — проекция скрытого состояния модели в пространство запросов.

Механизм извлечения формализуется как стохастический оператор:

$$R(q_t, K) \to C_t = \{k_{t,1}, \ldots, k_{t,m}\}, \tag{7}$$

где $C_t \subset K$ — релевантный контекст.

На уровне вероятностей полное распределение имеет вид

$$P(kq_t) = \frac{\exp(q_t, \varphi(k))}{\sum_{k' \in K} \exp(\langle q_t, \varphi(k') \rangle)}, \tag{8}$$

где $k \in K$ — элемент внешнего хранилища знаний (документ, абзац, факт); $q_t \in \mathbb{R}^d$ — вектор запроса, полученный из состояния LLM; $\varphi(k) \in \mathbb{R}^d$ — векторное представление элемента знания; $\langle q_t, \varphi(k) \rangle$ — скалярное произведение.

Математический смысл формулы $P(kq_t)$ заключается в том, что механизм извлечения выбирает знания с вероятностью, экспоненциально возрастающей по мере семантической близости между текущим запросом модели и векторным представлением знания.

Далее рассмотрим интеграцию извлеченного контекста в LLM, кодируемого как c_t:

$$c_t = \psi\left(C_t\right), \tag{9}$$

где ψ — агрегирующая функция (конкатенация, attention, pooling).

Обновленное скрытое состояние $\tilde{h_t}$:

$$\tilde{h}_t = \mathcal{F}\left(h_t, c_t\right), \tag{10}$$

где F — функция слияния (например, cross-attention).

Соответственно итоговое распределение:

$$P_\theta\left(x_t \middle| x_{<t}, C_t\right) = \mathrm{Softmax}\left(W\tilde{h}_t\right), \tag{11}$$

где $\tilde{h_t} \in \mathbb{R}^d$ — итоговое скрытое состояние; $W \in \mathbb{R}^{|v| \times d}$ — матрица выходных весовых коэффициентов; $\mathrm{Softmax}(W\tilde{h_t})$ — математический оператор нормализации, который преобразует вектор логитов (набор необработанных числовых предсказаний), полученных линейной проекцией скрытого состояния модели, в корректное дискретное распределение вероятностей по всем токенам словаря.

В итоге полная (совокупная) вероятностная модель может быть записана как вероятность последовательности токенов $x_{1:T}$ с учетом механизма извлечения знаний:

$$P\left(x_{1:T}\right) = \prod_{t=1}^{T} \sum_{C_t \subset K} P_\theta\left(x_t \mid x_{<t}, C_t\right) \cdot P\left(C_t \mid x_{<t}\right), \tag{12}$$

где $P(C_t \mid x_{<t})$ — распределение извлечения, модель является иерархической латентной моделью с внешней памятью.

Следовательно, генерация не осуществляется одномоментно, а представляется в виде разложения полной вероятности на цепочку условных вероятностей:

$$P(x_{1:T}) = P(x_1) \cdot P(x_2 \mid x_1) \cdot P(x_3 \mid x_1, x_2) \ldots \tag{13}$$

Таким образом, это позволяет интерпретировать математическую модель LLM как параметрическую аппроксимацию условного распределения языка, в которой механизм извлечения знаний $R(q_t, K)$ — внешний нелокальный оператор памяти модели, а вся совокупная вероятностная модель системы — гибридная вероятностная модель с разделением: долгосрочных знаний (хранящиеся в K) и краткосрочного контекста (представленного в $\tilde{h_t}$). Тем самым модель LLM не кодирует все знания непосредственно в параметрах, а условно подключает их из внешней памяти, корректно учитывая этот процесс в полной вероятностной формализации.

Результаты (Results)

Разработка интеллектуального диалогового ассистента выполнена для поддержки пользователей при получении и уточнении расписания учебных занятий. В условиях цифровой трансформации образовательного процесса оперативный доступ к актуальной информации, в частности к расписанию занятий, становится критически важным фактором организации учебной деятельности. В связи с этим возникает острая необходимость в разработке интеллектуальных диалоговых ассистентов нового поколения, способных понимать семантический контекст запроса и проявлять устойчивость к вариативности формулировок пользователей.

Актуальность предлагаемого подхода обусловлена интеграцией больших языковых моделей с технологией извлечения контекстных знаний RAG. Отличительной особенностью предлагаемого решения является устойчивость к вариативным формулировкам запросов (в том числе при отклонении от заранее заданных шаблонов), обеспечиваемая динамическим выбором нейросетевых языковых моделей и использованием механизма извлечения знаний для формирования точных

ответов. Такое сочетание позволяет преодолеть главную проблему генеративных моделей: обеспечить формирование ответов исключительно на основе верифицированных данных из базы расписания университета. На рис. 3 представлена архитектура разработанного диалогового ассистента с технологией RAG и голосовым интерфейсом.

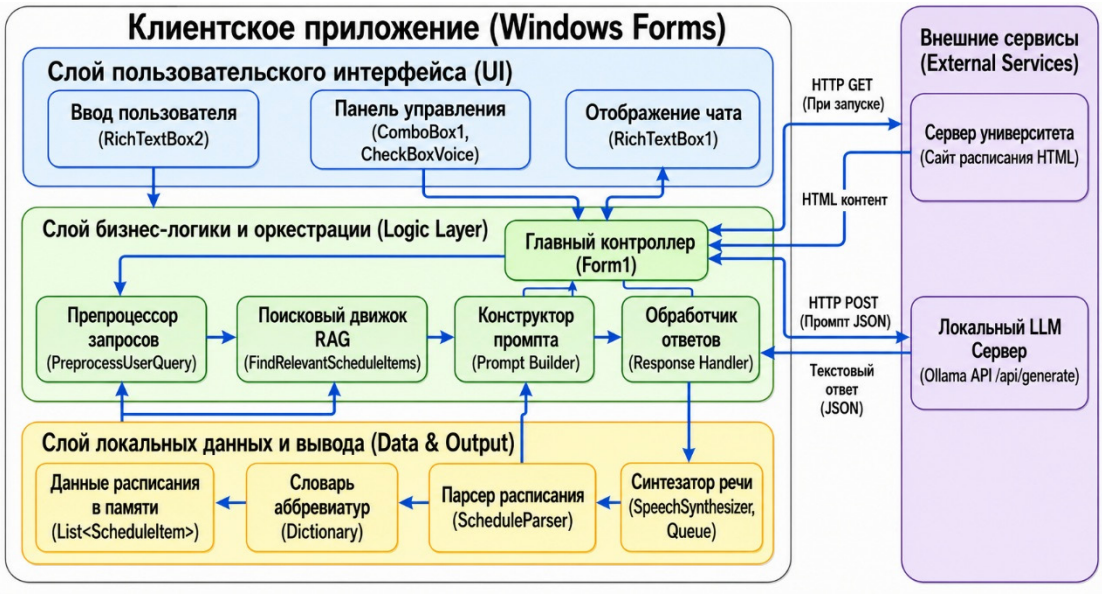


Рис. 3. Архитектура разработанного диалогового ассистента с технологией RAG и голосовым интерфейсом

Fig. 3. Architecture of the Developed Conversational Assistant with RAG Technology and a Voice Interface

Разработанный диалоговый ассистент представляет собой клиентское приложение (Windows Forms), интерфейс которого содержит следующие элементы управления: текстовое поле для отображения диалога пользователя и ассистента (RichTextBox1), текстовое поле для ввода вопросов пользователя (RichTextBox2), выпадающий список доступных языковых моделей (ComboBox1), кнопку отправки сообщений (Button1).

Класс Form1 выполняет роль оркестратора (контроллер RAG): принимает запрос пользователя и принимает решение, где находится информация: во внутренней векторной базе знаний (данные расписания в памяти), во внешних источниках (обновление данных с сайта) или в общих знаниях языковой модели, выбранной пользователем (локальный LLM-сервер). Для обновления данных о расписании на сайте университета в диалоговом ассистенте реализован парсинг. В контексте технологии RAG парсинг является фундаментом всей системы.

Парсинг веб-сайтов — это автоматизированное извлечение веб-данных, которое представляет собой алгоритмический процесс извлечения семантически значимой информации из гипертекстовых документов, размещенных в сети интернет. Данная процедура базируется на программной имитации клиентских запросов по протоколу HTTP к целевому серверу, в результате чего система получает исходный код веб-страницы, как правило, представленный на языке разметки HTML. Парсинг применяется практически везде, где необходимо автоматизировать сбор, обработку и анализ больших объемов информации. Это инструмент, который позволяет превратить хаотичные данные из сети Интернет или файлов в структурированную базу данных для принятия решений.

В архитектуре систем с технологией RAG модуль парсинга выполняет функцию фундаментального компонента ETL-конвейера, обеспечивающего первичную обработку и нормализацию гетерогенных массивов данных перед их помещением в векторную базу знаний. Данный процесс предполагает алгоритмическую трансформацию неструктурированной информации из различных форматов, таких как pdf, docx или HTML, в унифицированное текстовое представление, пригодное для последующей токенизации и генерации эмбеддингов.

Ключевой задачей парсинга в контексте RAG является обеспечение семантически корректной сегментации текста, известной как чанкинг (chunking). В отличие от примитивного разбиения по количеству символов, интеллектуальные алгоритмы парсинга анализируют структуру документа, идентифицируя логические блоки, такие как заголовки, параграфы и списки. Это позволяет формировать контекстные единицы, сохраняющие смысловую целостность, что критически важно для корректной работы языковых моделей при генерации ответов.

Особое значение имеет обработка табличных данных, где парсер должен не просто извлечь текст, но и сериализовать структуру таблицы в формат, интерпретируемый нейросетью, сохраняя реляционные связи между ячейками и заголовками столбцов. Таким образом, парсинг трансформирует «сырые» данные в структурированную базу знаний, выступая необходимым промежуточным звеном между источником информации и генеративной нейросетью.

Реализация парсинга для RAG-ассистента необходима, прежде всего, для построения надежного ETL-конвейера (Extract, Transform, Load). Расписание занятий — это динамически изменяемые данные, и статичная база знаний здесь неприменима. Парсинг обеспечивает регулярный сбор обновлений с веб-ресурса, гарантируя, что векторный индекс содержит актуальную информацию, а модель не генерирует ответы на основе устаревших данных. С технической точки зрения парсинг критичен для нормализации данных перед их отправкой в LLM. Веб-страницы структурируют информацию через HTML-теги, которые ориентированы на визуальное отображение в браузере, а не на машинное понимание. Если передать в LLM веб-страницу в HTML-формате, модель может утратить связь между заголовками колонок и содержимым ячеек.

Парсер выполняет сериализацию этой структуры: он преобразует вложенные таблицы в линейные, структурированные записи, где четко прописаны связи «время – предмет – аудитория». Кроме того, парсинг решает проблему зашумленности контекста. Веб-страница содержит множество служебных элементов: скрипты, стили, навигацию. Передача служебных элементов в контекстное окно модели не только тратит лимиты токенов, но и снижает качество поиска, так как релевантный сигнал теряется на фоне технического кода. Парсер извлекает исключительно полезную нагрузку, делая работу ассистента более точной и экономичной.

На рис. 4 представлена реализация логики программного класса SheduleParser для парсинга расписания с сайта ФГБОУ ВО «ГМУ имени адмирала Ф. Ф. Ушакова» (далее — ГМУ имени адмирала Ф. Ф. Ушакова). Разработанный класс SheduleParser предназначен для извлечения и обработки данных о расписании с веб-страницы, используя HTML-парсинг и обработку данных для дальнейшего использования в диалоговом ассистенте.

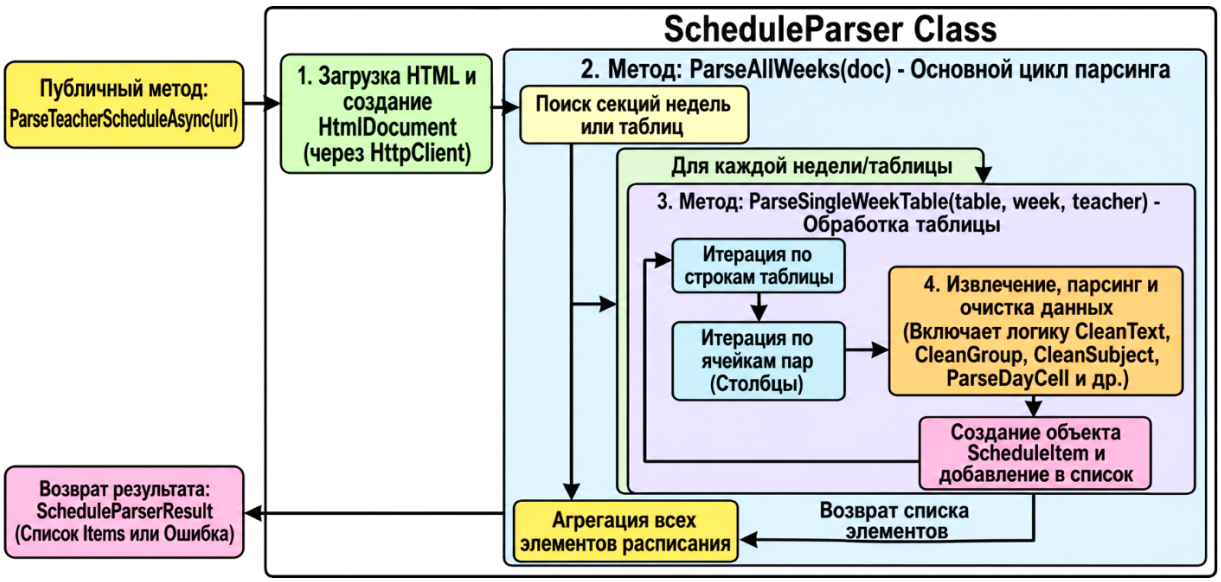


Рис. 4. Реализация логики программного класса SheduleParser для парсинга расписания
Fig. 4. Implementation of the SheduleParser Class Logic for Schedule Parsing

В конструкторе класса SheduleParser создается объект HttpClient, который используется для загрузки веб-страниц. Настроены заголовки HTTP-запросов, чтобы они выглядели как запросы от браузера (для обхода блокировок). Настроены кодировки для работы с текстом на русском языке в кодировке Windows-1251.

Расписание представлено на сайте в виде таблиц: для каждой недели семестра отдельная таблица с расписанием. Поэтому в классе SheduleParser реализована обработка таблиц расписания методом ParseSingleWeekTable, который извлекает следующие данные из таблицы для одной недели:

– строки таблицы, представляющие дни недели;

– время занятий извлекается из второй строки таблицы;

– каждая ячейка в таблице представляет занятие для определенной пары, из которой извлекается информация о группе, предмете и аудитории.

Методом ParseSingleWeekTable также извлекаются день недели и дата, которые переводят знания в векторное представление (эмбеддинги), обрабатывая ячейки с помощью регулярных выражений. Время пары автоматически добавляется из заранее определенного списка.

Рассмотрим реализованный фрагмент программного кода асинхронной функции CallOllama WithContextAsync — «интеллектуальный центр» разработанного диалогового ассистента. Данная функция отвечает за подготовку текста (промпта), который отправляется нейросети для генерации ответа:

```
private async Task<string> CallOllamaWithContextAsync(string modelName,
string userPrompt)
{
    var contextBuilder = new StringBuilder();
    contextBuilder.AppendLine("Ты – помощник по расписанию Полковниковой Н.А.
из ГМУ им. адмирала Ф.Ф. Ушакова. Отвечай на русском, будь вежлив и структу-
рируй информацию.");
    // --- ДОБАВЛЕНА СТРОГАЯ ИНСТРУКЦИЯ ПО ТЕРМИНОЛОГИИ ---
     contextBuilder.AppendLine("СТРОГОЕ ПРАВИЛО: никогда не употребляй слова
'урок', 'уроки' или 'уроков'. В университете проводятся 'пары' и 'занятия'.
Всегда используй слова 'пара', 'пары', 'занятие' или 'занятия'.");
    contextBuilder.AppendLine($"Справочник: {string.Join(", ", _
abbreviations.Select(kv => $"{kv.Key} = {kv.Value}"))}.");
    List<ScheduleItem> relevantItems = FindRelevantScheduleItems(userProm
pt);
    if (relevantItems.Count > 0)
    {
        contextBuilder.AppendLine("Основывай ответ исключительно на данных
ниже. Не придумывай информацию.");
        contextBuilder.AppendLine("\n--- ДАННЫЕ О РАСПИСАНИИ ---");
        foreach (var item in relevantItems.Take(15)) { contextBuild-er.Ap-
pendLine($"• {item.DayName}, {item.DateText}, {item.TimeRange} ({item.Week-
Period}): '{item.SubjectName}', гр. '{item.GroupNumber}', ауд. '{item.Room-
Number}'."); }
        contextBuilder.AppendLine("--- КОНЕЦ ДАННЫХ ---\n");
        contextBuilder.AppendLine("Ответь на вопрос пользователя, основыва-
ясь на этих данных.");
    }
    else { contextBuilder.AppendLine("В расписании нет информации. Ответь на
вопрос, используя общие знания, но помни, что ты ассистент по расписанию.");
}
    string finalPrompt = contextBuilder.ToString() + "\nВопрос: " + userPrompt;
    return await CallOllamaAsync(modelName, finalPrompt);
}
```

В строке (contextBuilder.AppendLine(...)) задается настройка роли и правил для нейросети ее назначение и правила поведения: «нейросеть является помощником по расписанию Н. А. Полковниковой, которая работает в “ГМУ имени адмирала Ф. Ф. Ушакова”». Далее задается поведение нейросети: «отвечай на русском, вежливо, структурируй». Затем указывается строгий запрет: запрещается использовать школьную лексику («урок») и заставлять использовать университетскую («пара», «занятие»). Это гарантирует, что диалоговый ассистент будет звучать профессионально.

Далее производится подключение «словаря»: строка «Справочник: {string.Join …»: берет заданный в базе знаний список аббревиатур (СППР, БД, СИИ и т. д.) и добавляет их расшифровки прямо в инструкцию. Теперь, если пользователь спросит про «СППР», нейросеть будет знать, что это дисциплина «Системы поддержки принятия решений». Затем методом FindRelevantScheduleItems (userPrompt) оркестратор RAG осуществляет поиск информации. Это поисковик по базе знаний расписания: он ищет занятия, которые соответствуют вопросу пользователя (по дате, предмету и т. д.).

Далее осуществляется внедрение данных в промпт: если данные найдены (строка relevantItems. Count > 0), то нейросети задается команда: «основывай ответ исключительно на данных, указанных ниже. Не придумывай информацию». Затем перечисляются найденные пары (день, время, аудитория). Это превращает нейросеть в точного информатора. Если же данные не найдены, то разрешаем нейросети использовать общие знания (например, чтобы просто поддержать разговор), но напоминаем ей о ее роли ассистента («В расписании нет информации. Ответь на вопрос, используя общие знания, но помни, что ты ассистент по расписанию»). Чтобы уменьшить риск галлюцинаций, в промпте задается требование отвечать только на основании предоставленного контекста и явно сообщать о недостатке данных.

В конце функции CallOllamaWithContextAsync производится соединение всей инструкции с конкретным вопросом пользователя (string finalPrompt = ...) и отправка в Ollama (await CallOllamaAsync). Таким образом, реализованный метод обрабатывает общий вопрос пользователя (например, «когда начинаются занятия по дисциплине СППР?», «когда начинаются занятия по Информатике?») и превращает его в подробное техническое задание для нейросети, снабженное правилами, терминами и конкретными данными из расписания для того, чтобы получить точный ответ (рис. 5).

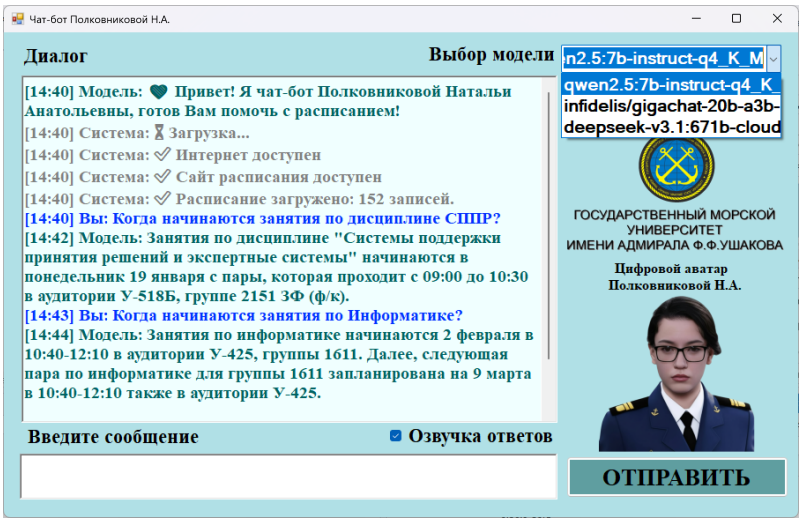


Рис. 5. Результат обработки вопросов пользователя по расписанию занятий
Fig. 5. Results of Processing User Queries Related to Class Schedules

Представленные результаты работы диалогового ассистента выполнены на примере расписания учебных занятий автора статьи доцента Н. А. Полковниковой. При запуске диалогового ассистента пользователю предлагаются на выбор три языковые модели: qwen2.5:7b-instruct-q4_K_M, gigaChat-20B-A3B-instruct-v1.5 и deepseek-v3.1:671b-cloud. В таблице выполнено сравнение параметров данных языковых моделей.

Таблица 1

Сравнение языковых моделей

Table 1

Comparison of language models

Параметр	Языковая модель		
	Qwen2.5: 7B-Instruct-Q4_K_M	GigaChat-20B-A3B-Instruct-v1.5	DeepSeek-V3.1:671B-Cloud
Разработчик	Alibaba Group (Китай)	Sber AI (Россия)	DeepSeek (Китай)
Архитектура / тип	Декодер-трансформер, открытая модель (7 млрд параметров)	Собственная архитектура, проприетарная/закрытая модель (около 20 млрд активируемых параметров)	MoE (Mixture of Experts), условно открытая (доступ через API, 671 млрд параметров, 37 В активных)
Квантование	Да (4-битное, метод GGUF Q4_K_M)	Нет (оригинальная точность)	Нет (работает в облаке)
Контекстное окно	128 тыс. токенов	32 тыс. токенов	128 тыс. токенов
Основной язык	Многоязычная, сильна в английском и китайском	Сильно оптимизирована для русского языка	Многоязычная, сильна в английском и китайском
Доступность	Полностью открытая, можно скачать и запускать локально	Закрытый API, доступ по запросу (в основном для РФ)	Бесплатный облачный API (с лимитами), веб-интерфейс, мобильное приложение
Лицензия	Apache 2.0	Проприетарная (условия использования Sber)	Условия использования DeepSeek (для API)
Особенности и сильные стороны	1. Эффективность и скорость на локальном железе (благодаря квантованию). 2. Хорошее качество для своего размера. 3. Полная конфиденциальность (локальный запуск)	1. Лучшее качество и понимание контекста на русском среди представленных. 2. Знание российской специфики и реалий. 3. Интеграция с сервисами Сбера (поиск и т. д.)	1. Наивысшее качество и «интеллект» в сравнении (огромный размер). 2. Поддержка загрузки файлов (изображения, PDF, Word и др.). 3. Поиск в интернете (по запросу). 4. Очень большой контекст
Основные сценарии использования	Локальные приложения, приватные развертывания, эксперименты на потребительском GPU/CPU, быстрое прототипирование	Продукты и сервисы для русскоязычной аудитории, требующие глубокого понимания нюансов русского языка и культуры	Сложные аналитические и творческие задачи, работа с большими документами, программирование, исследовательские цели (где нужна максимальная мощность)
Требования для запуска модели	Низкие: работает на среднем GPU или даже CPU	Зависит от тарифов API Sber. Запуск оригинальной модели локально требует значительных ресурсов (~40 Гб + VRAM)	Бесплатный API с лимитами. Требует подключения к Интернет. Локально не запускается

Для локального использования с хорошим балансом качества/скорости: эффективна автономная квантованная модель Qwen2.5:7B-Instruct. Для задач на русском языке, где критически важны точность, идиомы и культурный контекст: лучший выбор — GigaChat. Для максимально качественного решения сложных задач любого типа, работы с файлами и большими текстами: эффективна

модель DeepSeek-V3.1. Это самая мощная модель в списке с широкими возможностями, доступная бесплатно через API. Модель Qwen2.5 продемонстрировала высокую эффективность при локальном запуске, в то время как GigaChat-20B оказалась наилучшей для решения задач на русском языке, благодаря глубокому пониманию российской специфики и культурных особенностей. Модель DeepSeek-V3.1 с более высоким количеством параметров показала исключительные результаты в решении сложных аналитических задач и работе с большими объемами данных.

В разработанном диалоговом ассистенте реализована поддержка специальных команд пользователя для быстрого доступа к расписанию. Например, на рис. 6 представлен результат обработки команды пользователя: «дата 12 марта» — после полученной команды диалоговый ассистент выводит все занятия из расписания за указанную дату.

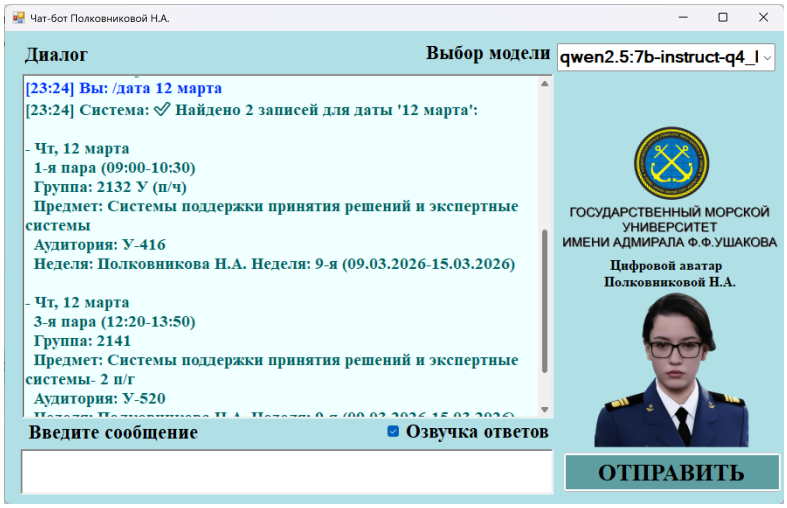


Рис. 6. Результат обработки команды пользователя
Fig. 6. Result of Processing a User Command

Если пользователь задает общий вопрос, который отсутствует в явном виде в расписании, то диалоговый ассистент использует общие знания, заложенные в выбранную языковую модель, но при этом помнит о роли ассистента и пытается связать ответ с дисциплинами в расписании. На рис. 7 представлен результат, когда пользователь задает общий вопрос: «*что такое большие данные*?»: сначала диалоговый ассистент связывает ответ с дисциплинами в расписании, а затем дает ответ по данному термину, используя общие знания.

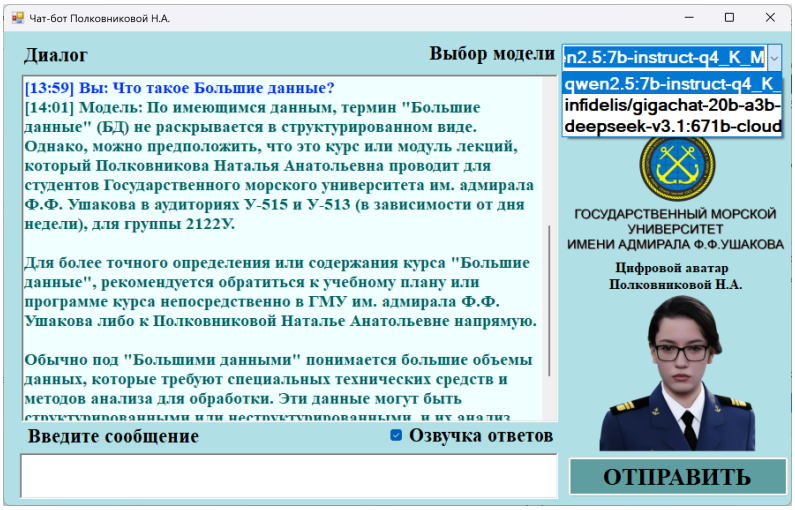


Рис. 7. Результат обработки общих вопросов пользователя
Fig. 7. Result of Processing General User Queries

В разработанном диалоговом ассистенте реализована функция озвучки ответов с помощью голосовых движков. Использование голосовых движков переводит систему из разряда классических чат-ботов в класс полноценных виртуальных цифровых ассистентов, приближая коммуникацию к формату естественного человеческого диалога. Данная функциональность особенно востребована в сценариях, когда визуальное восприятие информации с экрана затруднено или необходимо оперативное получение данных о расписании в фоновом режиме.

Заключение (Conclusion)

В работе рассмотрены этапы эволюции диалоговых систем — от ранних правил-ориентированных текстовых диалоговых программ, основанных на шаблонном сопоставлении входных высказываний, до современных виртуальных ассистентов, реализованных на основе нейросетевых трансформерных архитектур и больших языковых моделей. Описан процесс разработки диалогового ассистента с использованием нейросетевой архитектуры трансформера и технологии RAG, обеспечивающей доступ к актуальным данным через внешние базы знаний.

В рамках проведенного исследования разработан интеллектуальный диалоговый ассистент, способный эффективно поддерживать диалог и запросы пользователей при получении и уточнении расписания учебных занятий. Применение технологии извлечения контекстных знаний (RAG) в сочетании с динамическим выбором нейросетевых языковых моделей позволило значительно повысить точность ответов и устойчивость системы к вариативным формулировкам запросов. Это позволяет решить важную проблему генеративных моделей, обеспечивая ответы исключительно на основе верифицированных данных, что особенно важно в контексте работы с актуальной информацией, такой как расписание учебных занятий.

В диалоговом ассистенте реализована технология реализован RAG через механизм парсинга веб-страниц для обновления базы данных расписания с веб-ресурсов университета. Реализация парсинга веб-страниц стала важным компонентом системы, обеспечив регулярное обновление данных из внешних источников и поддержку актуальности расписания, что позволило избежать проблем с устаревшими данными и улучшить качество работы ассистента в реальных условиях. Рассмотрена реализация логики программного класса SheduleParser для парсинга расписания с сайта ФГБОУ ВО «ГМУ имени адмирала Ф.Ф. Ушакова». Разработанный класс SheduleParser предназначен для извлечения и обработки данных о расписании с веб-страницы, используя HTML-парсинг и обработку данных для дальнейшего использования в диалоговом ассистенте. Представленные результаты работы диалогового ассистента выполнены на примере расписания учебных занятий автора статьи доцента Н. А. Полковниковой.

Рассмотрен реализованный фрагмент программного кода асинхронной функции CallOllamaWithContextAsync – «интеллектуальный центр» разработанного диалогового ассистента. Реализованная функция отвечает за подготовку текста (промпта), который отправляется нейросети для генерации ответа. В функции определена настройка роли и правил для нейросети, а также назначение и правила поведения. Рассмотрены возможности динамического выбора языковой модели, а также функциональные особенности и преимущества каждой модели для различных сценариев применения. Особое внимание в работе было уделено выбору и интеграции языковых моделей, каждая из которых показала свои сильные стороны в зависимости от требований к задаче. Модель Qwen2.5:7B продемонстрировала высокую эффективность при локальном запуске, в то время как GigaChat-20B оказалась наилучшей для решения задач на русском языке благодаря глубокому пониманию российской специфики и культурных особенностей. Модель DeepSeek-V3.1, с более высоким количеством параметров, показала исключительные результаты в решении сложных аналитических задач и работе с большими объемами данных.

В результате проведенного исследования получены следующие научные результаты:

1. Предложена архитектура интеллектуального диалогового ассистента, основанная на интеграции технологии извлечения контекстных знаний (RAG) с механизмом динамического выбора нейросетевой языковой модели, что позволяет адаптивно выбирать генератор ответа в зависимости

от типа запроса и условий обработки. В известных решениях, как правило, используется фиксированная языковая модель, тогда как предложенная архитектура вводит уровень маршрутизации между несколькими LLM.

2. Выполнена формализация диалогового ассистента как гибридной вероятностной модели с внешней памятью, в которой процесс генерации зависит не только от параметров языковой модели, но и от стохастического оператора извлечения знаний из внешнего пространства. В работе получено математическое описание механизма интеграции извлеченного контекста в скрытое состояние LLM.

3. Разработан метод доменно-ориентированного формирования контекста для задач работы с динамически обновляемыми табличными данными (расписание учебных занятий), включающий специализированный парсинг веб-страниц, семантически корректный чанкинг и строгие правила промптинга, обеспечивающие формирование ответов исключительно на основе верифицированных данных.

4. Разработан метод обеспечения фактологической достоверности генеративных моделей в узком предметном домене через:

– строгую терминологическую фильтрацию на этапе промпт-инжиниринга (запрет школьной лексики «урок» в пользу университетской «пара»);

– интеграцию справочника аббревиатур непосредственно в системный промпт;

– механизм явного ограничения генерации рамками извлеченного контекста с детекцией отсутствия релевантных данных.

Эмпирически подтверждена корректность ответов диалогового ассистента при наличии данных в источнике.

5. Реализован полный ETL-конвейер RAG с парсингом веб-ресурсов университета как неотъемлемый компонент архитектуры в виде разработанного класса ScheduleParser. Это решает проблему устаревания знаний в образовательных доменах, где расписание обновляется еженедельно, — проблема, не решенная в классических статических реализациях RAG. Проведено сравнительное исследование эффективности трех LLM (Qwen, GigaChat, DeepSeek) в узком предметном домене «расписание вуза» с выявлением следующих закономерностей:

– GigaChat-20B демонстрирует преимущество в понимании русскоязычных запросов с культурно-специфической лексикой;

– квантованная модель Qwen2.5:7B обеспечивает приемлемое качество при локальном запуске;

– DeepSeek-V3.1 эффективен для сложных многоходовых запросов, но избыточен для простых фактологических вопросов.

Разработанный диалоговый ассистент продемонстрировал свою способность эффективно взаимодействовать с пользователями, обеспечивая точные и своевременные ответы на запросы, связанные с расписанием учебных занятий. Внедрение механизма извлечения контекстных знаний и интеграция различных языковых моделей открывает возможности для расширения функционала системы, включая поддержку более сложных сценариев взаимодействия и использование в других сферах. Полученные результаты подтверждают, что сочетание современных нейросетевых подходов с механизмами извлечения знаний является эффективным и перспективным решением для создания интеллектуальных диалоговых систем, способных к гибкому и точному ответу на запросы пользователей в условиях динамично меняющихся данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Attention is All you Need / A. Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar, J. Uszkoreit, L. Jones, A. N. Gomez, L. Kaiser, I. Polosukhin // Advances in Neural Information Processing Systems – 30 Curran Associates, Inc., 2017.

2. Large Language Models: A Survey [Электронный ресурс] / Minaee Sh., Mikolov T., Nikzad N. [и др.]. 2025. — Режим доступа: https://arxiv.org/abs/2402.06196 (дата обращения: 08.01.2026).

3. A Survey of Large Language Models [Электронный ресурс] / Zhao W. X., Zhou K., Li J. [и др.]. 2026. — Режим доступа: https://arxiv.org/abs/2303.18223 (дата обращения: 08.01.2026).

4. Challenges and Applications of Large Language Models [Электронный ресурс] / Kaddour J., Harris J., Mozes M. et al. 2023. — Режим доступа: https://arxiv.org/abs/2307.10169 (дата обращения: 08.01.2026).

5. A Comprehensive Survey of Small Language Models in the Era of Large Language Models: Techniques, Enhancements, Applications, Collaboration with LLMs, and Trustworthiness / F. Wang, Z. Zhang, X. Zhang, Z. Wu, TH. Mo, Q. Lu, W. Wang, R. Li, J. Xu, X. Tang, Q. He, Y. Ma, M. Huang, S. Wang // ACM Trans. Intell. Syst. Technol. — 2025. — Vol. 16. — Is. 6. DOI: 10.1145/3768165.

6. History, development, and principles of large language models: an introductory survey / Z. Wang, Z. Chu, T. V. Doan, S. Ni, M. Yang, W. Zhang // AI and Ethics. — 2025. — Vol. 5. — Is. 3. Pp. 1955–1971. DOI: 10.1007/s43681-024-00583-7.

7. Datasets for large language models: a comprehensive survey / Y. Liu, J. Cao, C. Liu, K. Ding, L. Jin // Artificial Intelligence Review. — 2025. — Vol. 58. — Is. 12. Pp. 403. DOI: 10.1007/s10462-025-11403-7.

8. Efficient multimodal large language models: a survey / Y. Jin, J. Li, T. Gu, Y. Liu, B. Zhao, J. Lai, Z. Gan, Y. Wang, C. Wang, X. Tan, L. Ma // Visual Intelligence. 2025. Vol. 3. Is. 1. Pp. 27. DOI: 10.1007/s44267-025-00099-6.

9. Retrieval-Augmented Generation for Large Language Models: A Survey [Электронный ресурс] / Y. Gao, Y. Xiong, X. Gao [et al]. — 2024. — Режим доступа: https://arxiv.org/abs/2312.10997 (дата обращения: 08.01.2026).

10. PaperQA: Retrieval-Augmented Generative Agent for Scientific Research [Электронный ресурс] / J. Lála, O. O'Donoghue , A. Shtedritski [et al]. — 2023. — Режим доступа: https://arxiv.org/abs/2312.07559 (дата обращения: 08.01.2026).

11. A Comprehensive Overview of Large Language Models / H. Naveed, A. U. Khan, S. Qiu, M. Saqib, S. Anwar, M. Usman, N. Akhtar, N. Barnes, A. Mian // ACM Trans. Intell. Syst. Technol. — 2025. — Vol. — 16. — Is. 5. DOI: 10.1145/3744746.

12. *Антонов И. В.* Применение больших языковых моделей для интеллектуального поиска и извлечения информации в корпоративных информационных системах / И. В. Антонов, Ю. В. Бруттан // Компьютерные исследования и моделирование. — 2025. — Т. 17. — № 5. — С. 871–888. EDN INCXRM. DOI: 10.20537/2076-7633-2025-17-5-871-888.

13. *Мансур А. М.* Разработка чат-бота для классификации и анализа текстов на естественном языке с использованием локальных больших языковых моделей / А. М. Мансур, Ж. Х. Мохаммад, Ю. А. Кравченко // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2025. — № 3(245). — С. 159–171. EDN TWDTOO. DOI: 10.18522/2311-3103-2025-3-159-171.

14. *Геворгян А. А.* Улучшение взаимодействия с абитуриентами через чат-боты на основе ии / А. А. Геворгян, В. А. Кудинов // Auditorium. —2024. — № 2(42). — С. 13–19. EDN MQEPFM.

15. *Родионов А. В.* Выбор инструментов построения чат-бота приемной комиссии учебного заведения / А. В. Родионов, Д. А. Корж // System Analysis and Mathematical Modeling. — 2024. — Т. 6. — № 3. — С. 367–376. EDN IXAVJL. DOI: 10.17150/2713-1734.2024.6(3).

16. *Савкина А. В.* Разработка клиентской части системы для реализации работы чат-бота / А. В. Савкина, Е. С. Матвеев // Тенденции развития науки и образования. — 2024. — № 115-15. — С. 107–112. EDN YOTZQA. DOI: 10.18411/trnio-11-2024-710.

17. *Вертоградов В. В.* Сравнительный анализ конкуренции генеративных чат ботов в России и мире / В. В. Вертоградов, С. В. Щелокова // Проблемы прогнозирования. — 2025. — № 5(212). — С. 73–84. EDN JWREBM. DOI: 10.47711/0868-6351-212-73-84.

18. *Вольников М. С.* Обзор существующих решений чат-ботов, использующих искусственные нейронные сети: их возможности, преимущества и недостатки / М. С. Вольников, Е. А. Данилов // Современные информационные технологии. — 2024. — № 39(39). — С. 9–15. EDN QZVHRL.

19. *Епрынцева Н. А.* Разработка чат-бота в социальной сети «ВКонтакте» для образовательной организации / Н. А. Епрынцева // Инженерный вестник Дона. — 2023. — № 9(105). — С. 656–668. EDN GSGGXB.

20. *Алексеенко В. А.* Разработка чат-бота для образовательных задач / В. А. Алексеенко, И. А. Татин // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. —2025. — № 2(26). — С. 8–15. EDN OWVACB.

21. Подходы к нейро-символической интеграции: большие языковые модели и базы знаний / В. А. Головко, В. В. Голенков, М. В. Ковалев, А. А. Крощенко, Д. В. Шункевич, В. П. Ивашенко // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. — 2025. — № 9. — С. 87–96. EDN DSLKGD.

22. *Шмат А. В.* Применение больших языковых моделей и технологии Retrieval-Augmented Generation для корпоративных ассистентов / А. В. Шмат // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2024. —№ 10. — С. 720–726. EDN GSNKPM. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-720-721.

23. *Герасименко Е. М.* Алгоритм поиска и приобретения знаний на основе технологий обработки и анализа текстов на естественном языке / Е. М. Герасименко, Ю. А. Кравченко, Д. А. Шаненко // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2024. — № 5(241). — С. 88–102. EDN GMUMBY. DOI: 10.18522/2311-3103-2024-5-88-102.

24. *Понимаш З. А.* Метод и алгоритм извлечения признаков из цифровых сигналов на базе нейросетей трансформер / З. А. Понимаш, М. В. Потанин // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2024. — № 6(242). — С. 52–64. EDN RRXXMK. DOI: 10.18522/2311-3103-2024-6-52-64.

25. Интеллектуальные системы управления и университетские комплексы транспортной отрасли: тренды и перспективы / О. В. Андреева, Е. В. Хекерт, М. Л. Сомко, А. И. Епихин // Мир транспорта. — 2024. — Т. 22. — № 1(110). — С. 94–99. EDN HCAFNK. DOI: 10.30932/1992-3252-2024-22-1-12.

26. *Епихин А. И.* Методы машинного обучения в мониторинге рабочего поведения морского двухтактного дизельного двигателя / А. И. Епихин, С. И. Кондратьев, Е. В. Хекерт // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. — 2024. — № 3(112). — С. 50–53. EDN BJAZCJ.

REFERENCES

1. Vaswani, A., I. Polosukhin et al. "Attention is All you Need." *Advances in Neural Information Processing Systems – 30*. Curran Associates, Inc., 2017.

2. Minaee, Shervin, et al. "Large Language Models: A Survey." arXiv, 2025. Web. 08 Jan. 2026 . <https://arxiv.org/abs/2402.06196>.

3. Zhao, Wayne Xin, et al. "A Survey of Large Language Models." arXiv, 2026. Web. 08 Jan. 2026 <https://arxiv.org/abs/2303.18223>.

4. Kaddour, Jean, et al. "Challenges and Applications of Large Language Models." arXiv, 2023. Web. 08 Jan. 2026 .

5. Wang, F., S. Wang et al. "A Comprehensive Survey of Small Language Models in the Era of Large Language Models: Techniques, Enhancements, Applications, Collaboration with LLMs, and Trustworthiness." *ACM Trans. Intell. Syst. Technol.* 16.6 (2025). DOI: 10.1145/3768165.

6. Wang, Z., W. Zhang et al. "History, development, and principles of large language models: an introductory survey." *AI and Ethics* 5.3 (2025): 1955–1971. DOI: 10.1007/s43681-024-00583-7.

7. Liu, Y., L. Jin et al. "Datasets for large language models: a comprehensive survey." *Artificial Intelligence Review* 58.12 (2025): 403. DOI: 10.1007/s10462-025-11403-7.

8. Jin, Y., L. Ma et al. "Efficient multimodal large language models: a survey." *Visual Intelligence* 3.1 (2025): 27. DOI: 10.1007/s44267-025-00099-6.

9. Gao, Yunfan, et al. "Retrieval-Augmented Generation for Large Language Models: A Survey." arXiv, 2024. Web. 08 Jan. 2026 <https://arxiv.org/abs/2312.10997>.

10. Lála, Jakub, et al. "PaperQA: Retrieval-Augmented Generative Agent for Scientific Research." arXiv, 2023. Web. 08 Jan. 2026 <https://arxiv.org/abs/2312.07559>.

11. Naveed, H., A. Mian et al. "A Comprehensive Overview of Large Language Models." *ACM Trans. Intell. Syst. Technol.* 16.5 (2025). DOI: 10.1145/3744746.

12. Antonov, I. V. and Yu. V. Bruttan. "Using rag technology and large language models to search for documents and obtain information in corporate information systems." *Computer Research and Modeling* 17.5 (2025): 871–888. DOI: 10.20537/2076-7633-2025-17-5-871-888.

13. Mansur, A. M., Zh. Kh. Mokhammad and Yu. A. Kravchenko. "Development of a chatbot for classification and analysis of natural language texts using local large language models." *Izvestiya Sfedu. Engineering Sciences* 3(245) (2025): 159–171. DOI: 10.18522/2311-3103-2025-3-159-171.

14. Gevorgyan, A. A. and V. A. Kudinov. "Improving interaction with applicants through ai-based chatbots." *Auditorium* 2(42) (2024): 13–19.

15. Rodionov, A. V. and D. A. Korzh. "Tools for building a chatbot for the admissions commission of an university." *System Analysis and Mathematical Modeling* 6.3 (2024): 367–376. DOI: 10.17150/2713-1734.2024.6(3).

16. Savkina, A. V. and E. S. Matveev. "Razrabotka klientskoy chasti sistemy dlya realizatsii raboty chatbota." *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya* 115-15 (2024): 107–112. DOI: 10.18411/trnio-11-2024-710.

17. Vertogradov, V. V. and S. V. Shchelokova. "Comparative Competitive Analysis of Generative AI Chatbots in Russia and Worldwide." *Studies on Russian Economic Development* 36.5 (2025): 643–652. DOI: 10.1134/S1075700725700376.

18. Vol'nikov, M. S. and E. A. Danilov. "Overview of existing chatbot solutions using artificial neural networks: their capabilities, advantages and disadvantages." *Sovremennye informatsionnye tekhnologii* 39(39) (2024): 9–15.

19. Epryntseva, N. A. "The development of a chatbot in the social network "vkontakte"for an educational organization." *Ingineering Journal of Don* 9(105) (2023): 656–668.

20. Alekseenko, V. A. and I. A. Tatin. "Development of a chatbot for educational purposes." *Information Technology and Mathematical Modeling in The Management of Complex Systems* 2(26) (2025): 8–15.

21. Golovko, V., V. Golenkov and M. Kovalev et al. "Approaches of Neuro-Symbolic Integration: Large Language Models and Knowledge Bases." *Information Technology and Mathematical Modeling in The Management of Complex Systems* 9 (2025): 87–96.

22. Shmat, A. V. "Application of large language models and retrieval-a ugmented generation technology for enterprise assistants." *Izvestiya Tula State University* 10 (2024): 720–726. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-720-721.

23. Gerasimenko, E. M., Yu. A. Kravchenko and D. A. Shanenko. "Algorithm for searching and acquisition of knowledge based on technologies for processing and analyzing texts in natural language." *Izvestiya Sfedu. Engineering Sciences* 5(241) (2024): 88–102. DOI: 10.18522/2311-3103-2024-5-88-102.

24. Ponimash, Z. A. and M. V. Potanin. "Method and algorithm for extracting features from digital signals based on neural networks transformer." *Izvestiya Sfedu. Engineering Sciences* 6(242) (2024): 52–64. DOI: 10.18522/2311-3103-2024-6-52-64.

25. Andreeva, O. V., E. V. Khekert, M. L. Somko and A. I. Epikhin. "Intelligent management systems and universities in the transport industry: trends and prospects ." *World of Transport and Transportation* 22.1(110) (2024): 94–99. DOI: 10.30932/1992-3252-2024-22-1-12.

26. Epikhin, A. I., S. I. Kondrat'ev and E. V. Khekert. "Machine learning methods in monitoring the operational behavior of a marine two-stroke diesel engine." *Transport of The Russian Federation* 3(112) (2024): 50–53.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Полковникова Наталья Анатольевна —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова»
353918, Российская Федерация,
Краснодарский край,
г. Новороссийск, пр. Ленина, 93
e-mail: *natalia-polkovnikova@mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Polkovnikova, Natalia A. —
PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education “Admiral F. F. Ushakov State Maritime University”
93, Lenin's avenue, Novorossiysk, Krasnodar Krai,
353918, Russian Federation
e-mail: *natalia-polkovnikova@mail.ru*

Статья поступила в редакцию: 03 февраля 2026 г.
Received: Feb. 3, 2026.

Научное издание

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова

Том 18. № 3

2026 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Дизайн и верстка *О. В. Пугачева, М. В. Смирнова*

Подписано в печать 26.06.26. Дата выхода в свет 30.06.26
Формат 60×90/8. Усл. печ. л. 25,0.
Тираж 500 (первый завод 30) экз. Свободная цена. Заказ № 292/26

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7

Издательство ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, Межевой канал, 2

Отпечатано на полиграфической базе издательства ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, Межевой канал, 2