Russian Journal of Water Transport

ISSN 2713-1858 (print)
ISSN 2713-1866 (online)

Научные проблемы ВОДНОГО ТРАНСПОРТА



№88 (3) 2026

Научные проблемы водного транспорта № 88 (3) 2026

http://journal.vsuwt.ru ISSN 2713-1858 (print)
DOI: https://doi.org/10.37890/jwt ISSN 2713-1866 (on-line)

Научные проблемы водного транспорта

№88 (3) 2026

Предыдущее название «Вестник ВГАВТ» (2002-2019 гг.)

Издание посвящено актуальным вопросам водного транспорта России и публикует новые научные разработки, результаты исследований, методы, методики и технологии по таким важным для отрасли направлениям как судостроение, судоремонт, экологическая безопасность судна, эксплуатация судового энергетического оборудования, гидротехническое строительство, эксплуатация водного транспорта, судовождение и безопасность судоходства, экономика, логистика и менеджмент на транспорте.

Целью журнала является создание научного пространства для распространения передовых знаний в области водного и других видов транспорта на территории России и за рубежом. Повышение авторитета национальных публикаций в мировом научном сообществе. Материалы выпуска рекомендуются научным сотрудникам, преподавателям высших учебных заведений, инженерам, аспирантам и студентам соответствующих специальностей.

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор), Свидетельство ПИ № ФС77-77658 от 17 января 2020 г. Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России»: **70191**

Выпускается **с 2002 года**, периодичность выпуска - **4 раза в год**, форма выпуска *печатный, сетевой,* язык *русский, английский.*

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волжскией государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»).

Адрес учредителя, издателя и редакции: 603950, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, д.5,
Тел. +8(831) 419-51-84

▪ **Журнал включен в** Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук **(Перечень ВАК)** по следующим специальностям:

2.5.17 Теория корабля и строительная механика
2.5.18 Проектирование и конструкция судов
2.5.19 Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства
2.5.20 Судовые энергетические установки и их элементы
2.9.7 Эксплуатация водного транспорта, водные пути, сообщения и гидрография
5.2.3 Региональная и отраслевая экономика

▪ Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

- Полные тексты статей журнала размещены в российских научных электронных библиотеках CyberLeninka, elibrary.ru, ЭБС «Лань», а также публикуются на сайте журнала http://journal.vsuwt.ru.
- Журнал подключен к международной системе библиографических ссылок Crossref
- Журнал предоставляет отрытый доступ к полным текстам публикаций на основе лицензии Creative Commons (CC BY 4.0) .



Статьи принимаются в журнал в электронном виде на e-mail: journal@vsuwt.ru (или через сайт журнала **http://journal.vsuwt.ru/).** Информация о порядке публикации и требованиях к оформлению статьи размещены на сайте журнала в разделе Авторам.

Редакция журнала осуществляет мониторинг корректного цитирования с помощью системы **«Антиплагиат».**

Редакция журнала осуществляет свою деятельность в соответствии с Положениями по соблюдению издательской этики, разработанными на основе международных стандартов:

1. положения, принятые на 2-ой Всемирной конференции по вопросам соблюдения добросовестности научных исследований (Сингапур, 22-24 июля 2010 г., http://www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/8102);
2. положения, разработанные Комитетом по этике научных публикаций (The Committee on Publication Ethics – COPE, http://publicationethics.org/resources/guidelines);
3. нормы главы 70 «Авторское право» Гражданского кодекса Российской Федерации http://www.gk-rf.ru/glava70.

Все научные статьи, поступившие в редакцию журнала «Научные проблемы водного транспорта» проходят обязательное двустороннее анонимное («слепое») рецензирование, Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов. Мнение членов редколлегии и редакции может не совпадать с точкой зрения авторов публикации.

Редакция и Редколлегия

Главный редактор
Кузьмичев Игорь Константинович, д.т.н., профессор, ректор, Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

Заместители главного редактора

Бурмистров Евгений Геннадьевич, д.т.н., профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

Митрошин Сергей Григорьевич, к.т.н., доцент, проректор по конвенционной подготовке и международной деятельности

Ответственный редактор
Гордлеев Сергей Дмитриевич, начальник Управления по научной и инновационной деятельности, Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

Ответственный секретарь
Раева Ольга Александровна, начальник издательского отдела, Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

Члены Редколлегии
Безюков Олег Константинович, д.т.н., профессор, академик РАТ, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, г. С.-Петербург, Россия;

Белых Владимир Николаевич, д.т.н., профессор, академик РАТ, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, г. С.-Петербург, Россия;

Бик Юрий Игоревич, д.т.н., профессор, Сибирский государственный университет водного транспорта, г. Новосибирск, Россия;

Бимберекov Павел Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теории корабля, судостроения и технологии материалов, Сибирский государственный университет водного транспорта, г. Новосибирск, Россия

Ваганов Александр Борисович, д.т.н., доцент, Институт транспортных систем Нижегородского государственного технического университета им.Р.Е.Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия;

Гаврилов Александр Иванович, д.э.н., профессор, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, г. Москва, Россия;

Гирин Станислав Николаевич, к.т.н., профессор, Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия;

Грамузов Евгений Михайлович, д.т.н., профессор, Институт транспортных систем Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия;

Домнина Ольга Леонидовна, к.т.н., доцент, Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия;

Ермаков Станислав Александрович, д.ф.-м.н., профессор, Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия;

Казаков Николай Николаевич, к.т.н., доцент, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Беларусь;

Калинина Надежда Викторовна, к.т.н., доцент, зав. кафедрой кораблестроения и авиационной техники, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия

Кириченко Александр Викторович, д.т.н., профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова;

Корнилов Дмитрий Александрович, д.э.н., профессор, академик РАЕН, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия;

Королёв Юрий Юрьевич, к.э.н., доцент, Институт бизнеса и менеджмента технологий Белорусского государственного университета, г. Минск, Беларусь;

Королева Елена Арсентьевна, д.э.н., профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, г. С.-Петербург, Россия;

Костров Владимир Николаевич, д.э.н., профессор, Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия;

Кочнев Юрий Александрович, д.т.н., доцент, Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия;

Лаврентьева Елена Александровна, д.э.н. профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, г. С.-Петербург, Россия;

Лапаев Дмитрий Николаевич, д.э.н., профессор, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия

Липатов Игорь Викторович, д.т.н., профессор, Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия;

Мареев Евгений Анатольевич, д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, заместитель директора ИПФ РАН по научной работе, Нижний Новгород, Россия;

Матвеев Юрий Иванович, д.т.н., профессор, Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия;

Метёлкин Павел Владимирович, д.э.н., профессор, Российский университет транспорта РУТ (МИИТ), институт экономики и финансов, г. Москва, Россия

Никущенко Дмитрий Владимирович, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, г. С.-Петербург, Россия;

Ничипорук Андрей Олегович, д.т.н., доцент, Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия;

Пластинин Андрей Евгеньевич, д.т.н., доцент, Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия;

Решняк Валерий Иванович, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, г. С.-Петербург, Россия.

Роннов Евгений Павлович, д.т.н., профессор, Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия;

Сахно Константин Николаевич, д.т.н., профессор, Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Россия

Ситнов Александр Николаевич, д.т.н. профессор, Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия;

Сичкарев Виктор Иванович д.т.н., профессор, профессор кафедры Судовождения, Сибирский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «СГУВТ»)

Соловьев Алексей Валерьевич, д.т.н. заместитель директора, ФАУ Российский Речной Регистр, Верхне-Волжский филиал, г. Нижний Новгород, Россия;

Удалов Олег Федерович, д.э.н., профессор, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия;

Уметалиев Акылбек Сапарбекович, д.э.н., профессор, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, Киргизстан;

Уртминцев Юрий Николаевич, д.т.н. профессор, Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия;

Цветков Юрий Николаевич, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, г. С.-Петербург, Россия.

© ВГУВТ, 2026

http://journal.vsuwt.ru ISSN 2713-1858 (print)
DOI: https://doi.org/10.37890/jwt ISSN 2713-1866 (on-line)

Russian Journal of Water Transport

№88 (3) 2026

The previous name «Bulletin of VSAWT» (2002-2019)

The journal is devoted to the topical issues of water transport in Russia and publishes scientific materials, research results, methods and technologies in such important areas for the industry as shipbuilding, ship repair, environmental safety of a ship, operation of ship power plants, hydraulic engineering, navigation, navigation safety, economics, logistics and transport management.

The purpose of the journal is the scientific area creation for dissemination of advanced knowledge in the field of water and other kinds of transport in Russia and abroad and for the increasing authority of national publications in global scientific community. The materials of the issue are recommended for researches, teachers of higher educational institutions, engineers, graduate students and students of the relevant specialties.

The journal is registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media (Roskomnadzor) certificate PI No. FS77-77658 dated January 17, 2020. Subscription index in the united catalog «Press of Russia»: 70191.

The journal has been published since 2002, **4 times a year**; the form of issue is *printe*d, *networked*, language *Russian and English*

Founder and publisher: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Volga State University of Water Transport»

Founder, publisher and editorial address: 603950, Russian Federation, Nizhny Novgorod, st. Nesterova, 5, Tel. +8 (831) 419-51-84

▪The journal is included in the List of peer-reviewed scientific publications, in which the main scientific results of dissertations for the degree of candidate of science, for the degree of doctor of sciences (List of Higher Attestation Commission) in the following specialties should be published:

2.5.17 Theory of the ship and structural mechanics
2.5.18 Ship design and construction
2.5.19 Technology of shipbuilding, ship repair and organization of shipbuilding production
2.5.20 Ship power plants and their elements
2.9.7 Operation of water transport, waterways, communications and hydrography
5.2.3 Regional and sectoral economy

▪ The journal is included in the system of the Russian Science Citation Index (RSCI)

- The full texts of the journal articles are posted in the Russian scientific electronic libraries CyberLeninka, elibrary.ru, EBS «Lan», and are also published on the journal's website http://journal.vsuwt.ru/

- The journal is connected to the international system of bibliographic references Crossref
- The journal provides open access to the full text of publications on a license basis Creative Commons (CC BY 4.0)



Articles are accepted in the journal in electronic form by e-mail: journal@vsuwt.ru (or through the magazine's website http://journal.vsuwt.ru/)

Information about the publication procedure and requirements for the article formatting is posted on the journal's website in the For Authors section. The editorial board of the journal monitors the correct citation using Antiplagiat system.

The editorial board of the journal carries out its activities in accordance with the Provisions on the observance of publishing ethics, developed on the basis of the international standards:

1. provisions adopted at the 2nd world conference on integrity of scientific studies (Singapore, July 22-24, 2010; http://www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/8102);
2. provisions developed by the Committee on publication ethics (The Committee on Publication Ethics – COPE; http://publicationethics.org/resources/guidelines);
3. norms of Chapter 70 «Copyright» of the Civil code of the Russian Federation http://www.gk-rf.ru/glava70

All scientific articles submitted to the editorial office of the journal «Scientific Problems of Water Transport» are subject to mandatory bilateral anonymous («blind») reviewing. All reviewers are recognized experts on the subject of the reviewed materials. The opinion of the members of the editorial board and editorial staff may not coincide with the authors point of view.

Editorial Team

Editor In chief: Igor K. Kuzmichyov, Dr. Sci. (Tech.), professor, Volga state unuversity of water transport, Nizhny Novgorod, Russia

Editor In chief deputy: Evgeniy G. Burmistrov, Dr. Sci. (Tech..), professor, Volga state unuversity of water transport, Nizhny Novgorod, Russia
Editor In chief deputy: Sergey G. Mitroshin, Cand. Sci. (Tech.), Volga state unuversity of water transport, Nizhny Novgorod, Russia

Contributing Editor: Sergey D. Gordleev, Volga state unuversity of water transport, Nizhny Novgorod, Russia

Executive Secretary: Olga A. Raeva, Volga state unuversity of water transport, Nizhny Novgorod, Russia
Editorial board

Oleg K. Bezyukov, Dr. Sci. (Tech), professor, academician of Russian Transport academy, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St.-Petersburg, Russia;

Vladimir N. Belikh, Dr.Sci. (Phys-Math.), professor, Volga state unuversity of water transport, Nizhny Novgorod, Russia;

Yuriy I. Bik, Dr. Sci. (Tech.), professor, Siberian state university of water transport, Novosibirsk, Russia;

Pavel A. Bimberekov, Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, Professor at the Department of Ship Theory, Shipbuilding, and Materials Technology, Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia

Alexandr B. Vaganov, Dr. Sci. (Tech.), assistant professor, Institute of transportation system of NSTU, named after R.E. Alekseyev, Nizhny Novgorod, Russia;

Alexandr I. Gavrilov, Dr. Sci. (Econ.), professor, FSBEE H.Ed.» Russian academy of national economy and public service under the President of Russian Federation, Moscow, Russia;

Stanislav N. Guirin, Cand. Sci. (Tech.), Volga state unuversity of water transport, Nizhny Novgorod, Russia;

Evgeniy M. Gramuzov, Dr. Sci. (Tech.), professor, Institute of Transportation System NSTU, named after R.E. Alekseyev, Nizhny Novgorod, Russia;

Olga L. Domnina, Cand. Sci. (Tech.), assistant professor, Volga state university of water transport, Nizhny Novgorod, Russia;

Stanislav A. Yermakov, Dr. Scs. (Phys-Math.), professor, Volga state unuversity of water transport, Nizhny Novgorod, Russia;

Nikolay N. Kazakov, Cand. Sci. (Tech.), deputy dean of Belorassian State University of Transport, Gomel, Belarus;

Nadezhda V. Kalinina, Cand. Sci. (Techn.), Associate Professor, Head of the Department of Shipbuilding and Aviation Engineering, R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia

Alexandr V. Kirichenko, Dr. Sci. (Tech.), professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St.-Petersburg, Russia;

Dmitriy A. Kornilov, Dr. Sci. (Econ.), professor, NSTU, named after R.E. Alekseyev, Nizhny Novgorod, Russia;

Yuriy Yu. Korolyov, Cand. Scs. (Econ.), assistant professor, Belorussian state university (I.B.M.T BSU), Minsk, Belarus;

Elena A. Koroleva, Dr. Sci. (Econ.), professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St.-Petersburg, Russia;

Vladimir N. Kostrov, Dr. Sci. (Econ.), professor, Volga state unuversity of water transport, Nizhny Novgorod, Russia;

Yuri A. Kochnev, Dr. Sci. (Tech.), assistant professor, Volga state unuversity of water transport, Nizhny Novgorod, Russia;

Dmitriy N. Lapaev, Member of RANS, Dr. Sci. (Econ.), Deputy Director for Research of the Institute of Economics and Management of Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev

Yelena A. Lavrentyeva., Dr. Sci. (Econ.), professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St.-Petersburg, Russia;

Igor V. Lipatov, Dr. Sci. (Tech.), professor, Volga state unuversity of water transport, Nizhny Novgorod, Russia;

Evgeniy A. Mareev, Dr. Sci. (Phys-Math), Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, full member, Nizhny Novgorod, Russia;

Yuriy I. Matveyev, Dr. Sci. (Tech.), professor, Volga state unuversity of water transport, Nizhny Novgorod, Russia;

Pavel V. Metelkin, Dr. Sci. (Econ.), professor, Russian university of transport (MIIT), Moscow, Russia;

Dmitriy V. Nikushenko, Dr. Sci. (Tech.), professor, State Marine Technical University, St.-Petersburg, Russia;

Andrey.O. Nichiporuk, Dr. Sci. (Tech.), assistant professor, Volga state university of water transport, Nizhny Novgorod, Russia;

Andrey.E. Plastinin, Dr. Sci. (Tech.), Volga state university of water transport, Nizhny Novgorod, Russia;

Valeriy I. Reshnyak, Dr. Sci (Tech.), professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St.-Petersburg, Russia;

Evgeniy P. Ronnov, Dr. Sci. (Tech.), professor, Volga state unuversity of water transport, Nizhny Novgorod, Russia;

Konstantin N. Sakhno, Dr. Sci. (Tech.), professor, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia;

Alexandr N. Sitnov, Dr. Sci. (Tech.), professor, Volga state unuversity of water transport, Nizhny Novgorod, Russia;

Viktor I. Sichkarev Doctor of Technical Sciences, Professor of Navigation Department, Siberian State University of Water Transport,

Alexey V. Soloviev, Dr. Sci. (Tech.), associate Director, Upper Volga branch of the Russian River Register, Nizhny Novgorod, Russia;

Oleg F. Udalov, Dr. Sci. (Econ.), professor, FSAEI H.Ed. NNSU named after Lobachevsky, Nizhny Novgorod, Russia;

Akylbek S. Umetalyev, Dr. Sci. (Econ.), professor, Kyrgyz State Technical University named after Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan;

Yuriy N. Urtmintsev, Dr. Sci. (Tech.), professor, Volga state unuversity of water transport, Nizhny Novgorod, Russia;

Yuriy N. Tsvetkov, Dr. Sci (Tech.), professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St.-Petersburg, Russia.

© VSUWT, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Судостроение, судоремонт и экологическая безопасность судна

В.В Бочарова, А.А. Антонов, О.О. Дробышева, В.Ю. Стадников
Математическое моделирование распространения ультразвуковых волн в приемной трубке гидродинамического лага нового типа 13

С.В. Васькин, Е.А. Лукина, А.И. Самосюк
Методология разработки модулей «Судовые устройства и системы» VR-тренажёра «Теория устройства судна» и применение в учебном процессе 24

Д.А. Кирсанова, Л.Г. Орлова, А.В. Соловьев, Ю.С. Федосенко
О концепции разработки модельно-алгоритмического обеспечения цифровой системы поддержки принятия решений при оценке технического состояния корпуса судна 35

А.В. Посадская
Архитектурно-конструктивные особенности круизных судов 46

И.Д. Степанов, Е.М. Грамузов
Обоснование математической модели выбора основных элементов сухогрузного судна 57

А.А. Трочук, А.Р. Рубан
Анализ основных механизмов деградации корпуса судна: синергетика, моделирование и методы контроля 67

Судовое энергетическое оборудование

С.В. Терлыч
Повышение эффективности судовых газотурбинных установок устранением влияния перекосов осей соединительных валов 80

О.П. Шураев, А.И. Самосюк
Теоретическая швартовная характеристика и оценка согласованности гребного винта и главного двигателя транспортных судов внутреннего плавания 94

Экономика, логистика и менеджмент на транспорте

С.Д. Гордлеев, О.Л. Трухинова
Системная диагностика взаимодействия ВГУВТ и предприятий водного транспорта: выявление потерь и оптимизация контуров управления 107

Р.В. Гулидов, М.В. Холоша, А.Н. Гаврилов
Порт-хаб в транспортной системе юга Приморского края 118

Т.Н. Кашицына, М.Э. Ковалев
Водный транспорт в XXI веке: барьеры роста и векторы развития в новой экономической реальности 128

Д.А. Коршунов, А.П. Бафанов
Инновационная транспортная услуга как драйвер роста экономики 137

В.В. Крайнова
Платный прием в транспортные вузы в 2026 году: новые правила и возможные последствия 149

6.В. Цверов, Е.В. Разина
Моделирование транспортно-логистических процессов с использованными поддонами в экономике замкнутого цикла 162

Эксплуатация водного транспорта, водные пути, сообщения и гидрография

А.Е. Асташин, Г.Д. Пономарев, И.С. Гусев, Т.С. Нефедова
Межсезонная динамика стока малых рек лесостепной зоны Нижегородской области в условиях малоснежной зимы на примере р. Медяна 174

Ю. И. Бик, Н. Н. Фомичева
Влияние температурного режима на напряженное состояние блоков бетонирования гидротехнических сооружений 185

С.С. Герасимов, А.Н. Ситнов
Исследование влияния скорости судна на русловой процесс в канале разной глубины по результатам математического моделирования г
идравлики потока 196

С.В. Ермаков, Н.Ж. Малинин, Д.В. Шевчук
Принципы формирования процессных цифровых двойников судна 206

М.В. Осокин, М.В. Жуков
Практический анализ риска возникновения «чистой» потери остойчивости при заливании палубы на примере судна «OLYMPIC INTERVENTION IV» 221

В.В. Фирсов, Ю.Н. Уртминцев
Оптимизация оперативного планирования работы флота с применение информационных технологий 228

CONTENTS

Shipbuilding, ship repair and ecological safety of the ship

Victoria V. Bocharova, Alexander A. Antonov, Olga O. Drobysheva, Victor Y. Stadnikov
Mathematical modeling of ultrasonic wave propagation in the receiving tube of a new type of hydrodynamic log 13

Sergey V. Vas'kin, Evgeniya A. Lukina, Alina I. Samosyuk
Methodology for developing the «Ship devices and systems» modules of the «Ship theory» VR simulator and their application in the educational process 24

Darya A. Kirsanova, Lyudmila G. Orlova, Alexey V. Soloviev, Yuriy S. Fedosenko
On the concept of developing model-algorithmic software for a digital decision support system for the technical condition assessment of a ship hull 35

Anastasia V. Posadskaya
Design features of cruise ships 46

Igor D. Stepanov, Evgeny M. Gramuzov
Substantiation of the mathematical model for selecting the main elements of a dry cargo vessel 57

Anton A. Trochuk, Anatoly R. Ruban
Analysis of the main mechanisms of ship hull degradation: synergistics, modeling, and monitoring methods 67

Ship power equipment

Stanislav V. Terlych
The increasing the efficiency of marine gas turbine installations by eliminating the effect of misalignment of the connecting shafts 80

Oleg P. Shurayev, Alina I. Samosyuk
Theoretical mooring characteristics and evaluation of the consistency of the propeller and main engine of inland navigation transport vessels 94

Economics, logistics and transport management

Sergey D. Gordleev, Olga L. Trukhinova
Systemic diagnostics of the interaction between VSUWT and water transport enterprises: identifying losses and optimising management contours 107

Ruslan V. Gulidov, Mikhail V. Holosha, Alexander N. Gavrilov
Port hub in the transport and logistics system of southern Primorsky Krai 118

Tatyana N. Kashitsina, Maxim E. Kovalev
Water transport in the 21st century: barriers to growth and development vectors in the new economic reality 128

Dmitry A. D.A. Korshunov, Artem P. Bafanov
Innovative transport service as a driver of economic growth 137

Vera V. Krainova
Paid admission to transport universities in 2026: new rules and possible consequences 149

Vladimir V. Tsverov, Ekateruba V. Razina
Modeling of transport and logistics processes with used wooden pallets in the circular economy 162

Water transport operation, waterways communications and hydrography

Andrej E. Astashin, Grigoriy D. Ponomarev, Ivan S. Gusev, Tat'yana S. Nefedova
Seasonal dynamics of small river flow in the forest-steppe zone of the Nizhny Novgorod region during an extremely low-snow winter a case study of the Medyana river 174

Yu. I. Bik, Nyailya N. Fomicheva
Influence of the temperature regime on the stress state of concrete blocks of hydraulic structures 185

Sergey S. Gerasimov, Aleksandr N. Sitnov
Study of the influence of vessel speed on the channel process in a channel of different depths based on the results of mathematical modeling of flow hydraulics 196

Sergey V. Ermakov, Nikita Zh. Malinin, Danila V. Shevchuk
Creating process-centric digital twins of a vessel principles 206

Mikhail V. Osokin, Maxim V. Zhukov
A practical analysis of the risk of pure loss of stability during deck flooding using the example of the vessel «OLYMPIC INTERVENTION IV» 221

Viktor V. Firsov, Yuriy N. Urtmintsev
Optimization of fleet operational planning using information technologies 228

СУДОСТРОЕНИЕ, СУДОРЕМОНТ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СУДНА

SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND ECOLOGICAL SAFETY OF THE SHIP

УДК 629.5 (004.94)
DOI: 10.37890/jwt.vi88.747

Математическое моделирование распространения ультразвуковых волн в приемной трубке гидродинамического лага нового типа

В.В Бочарова
А.А. Антонов
О.О. Дробышева
В.Ю. Стадников
Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, г. Владивосток, Россия

Аннотация: Актуальность исследования обусловлена негативным влиянием биообрастания на точность работы судовых навигационных приборов, в частности гидродинамических лагов нового типа, что приводит к погрешностям в определении скорости и пройденного расстояния. Целью работы является математическое и имитационное моделирование процесса распространения ультразвуковых волн в приемной трубке гидродинамического лага для обоснования параметров системы защиты от обрастания, основанной на явлении кавитации. В качестве инструмента исследования использован программный комплекс COMSOL Multiphysics, позволяющий решать связанные мультифизические задачи. Результаты моделирования визуализируют распределение ультразвукового поля по поверхности и в объеме трубки, подтверждая возможность генерации акустической кавитации для разрушения органического слоя. Полученные данные позволяют перейти к созданию малогабаритной системы защиты, размещенной в клинкете, что повышает надежность навигационного оборудования и снижает эксплуатационные затраты.

Ключевые слова: математическое моделирование, гидродинамический лаг, ультразвук, кавитация, биообрастание, COMSOL Multiphysics

Mathematical modeling of ultrasonic wave propagation in the receiving tube of a new type of hydrodynamic log

Victoria V. Bocharova
Alexander A. Antonov
Olga O. Drobysheva
Victor Y. Stadnikov
Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Russia

Abstract: The relevance of the research is due to the negative impact of biofouling on the accuracy of shipboard navigation instruments, in particular hydrodynamic logs of a new type, which leads to errors in determining speed and distance traveled. The aim of the work is mathematical and simulation modeling of the propagation process of ultrasonic waves in the receiving tube of a hydrodynamic log to substantiate the parameters of an anti-fouling protection system based on the phenomenon of cavitation. The COMSOL Multiphysics

software package, which allows solving coupled multiphysics problems, was used as a research tool. The simulation results visualize the distribution of the ultrasonic field over the surface and in the volume of the tube, confirming the possibility of generating acoustic cavitation to destroy the organic layer. The obtained data enable the creation of a compact protection system placed in the clinket, which increases the reliability of navigation equipment and reduces operating costs.

Keywords: mathematical modeling, hydrodynamic log, ultrasound, cavitation, biofouling, COMSOL Multiphysics

Введение

Обрастание подводной части корпуса судна и его выступающих элементов морскими организмами является серьезной эксплуатационной проблемой (рис.1).



Рис. 1. Обрастание корпуса судна морскими организмами

Для судовых измерителей скорости – лагов – этот фактор критичен, так как слой обрастания на приемных устройствах (трубках, датчиках давления) искажает гидродинамический поток, что приводит к нестабильности измерений и снижению точности вычисления скорости [1].

Традиционные методы борьбы с обрастанием включают механическую очистку, химические покрытия на основе биоцидов, электрические, термические и ультразвуковые способы [2–4]. Механическая очистка трудоёмка и может повреждать защитные покрытия; периодичность её проведения на активно обрастающих акваториях составляет 3–6 месяцев. Химические покрытия, например, с медью или цинком, эффективны в течение 2–3 лет, но токсичны для морской среды, накапливаются в донных отложениях и постепенно вытесняются природоохранным законодательством [5]. В последние десятилетия активно развиваются акустические методы, основанные на излучении ультразвука (рис.2). В таблице 1 приведено сравнение основных методов борьбы с обрастанием по эксплуатационным показателям.

Таблица 1

Сравнительная характеристика методов защиты от обрастания

Параметр	Механическая очистка	Химические покрытия	Ультразвуковой метод
Периодичность применения	3–6 месяцев	2–3 года (покрытие)	Постоянно (оборудование)
Экологическая безопасность	Высокая	Низкая (токсично)	Высокая
Влияние на точность лага	Возможны повреждения	Не влияет	Не влияет
Трудоёмкость обслуживания	Высокая (водолазы)	Низкая (при нанесении)	Низкая (контроль)



Рис. 2. Корпус судна после очистки акустическим методом

Ультразвуковые волны частотой выше 20 кГц способны либо создавать кавитацию, разрушающую клетки организмов, либо вызывать микровибрации поверхности, препятствующие закреплению личинок и спор. Важным преимуществом является то, что частота 30 кГц находится выше диапазона слуха большинства рыб (до 2–3 кГц) и морских млекопитающих (до 20–22 кГц) [6,7], что минимизирует прямое акустическое воздействие на них. Однако, как показывают исследования [7], некоторые беспозвоночные (асцидии) могут реагировать на ультразвук, поэтому необходима осторожность при массовом применении в портах и маринах.

Ультразвуковой метод, основанный на эффектах кавитации и субкавитации, лишен этих недостатков и позволяет создавать автоматические системы защиты, работающие в процессе эксплуатации [8-10].

Цель данной работы – с помощью методов математического моделирования в среде COMSOL Multiphysics исследовать распределение ультразвукового поля в

приемной трубке гидродинамического лага для определения возможности использования акустической кавитации для предотвращения биообрастания.

Математическая постановка задачи

Анализ физических и химических методов защиты показал, что ультразвуковая технология является наиболее предпочтительной для гидродинамических лагов нового типа [11]. В таких лагах предполагается использование миниатюрных датчиков давления, встраиваемых непосредственно в приемную трубку, что исключает протяженные трубопроводы и повышает точность [12]. Это позволяет разместить ультразвуковой излучатель компактно, в непосредственной близости от чувствительных элементов. Ультразвук высокой интенсивности вызывает в жидкости акустическую кавитацию – образование, рост и схлопывание парогазовых пузырьков. При схлопывании пузырька возникает локальный гидравлический удар и микропотоки, обладающие достаточной энергией для разрушения первичной биопленки и предотвращения прикрепления личинок обрастателей [13].

С точки зрения математического моделирования, процесс распространения ультразвуковых волн в конструкции лага представляет собой связанную задачу динамики деформируемого твёрдого тела и акустики жидкости. Подобные задачи относятся к классу задач математической физики и требуют применения современных численных методов для своего решения.

Объектом исследования является трубка современного гидродинамического лага со следующими геометрическими параметрами (рис.3):

– длина трубки: L = 1,5 м;
– наружный диаметр: D = 50 мм;
– толщина стенки: h = 3 мм.

Материал трубки – медно-никелевый сплав с характеристиками:

– плотность: ρ= 8900 кг/м³;
– модуль Юнга: E = 130 ГПа;
– коэффициент Пуассона: η= 0.33.



Рис. 3. Модель гидродинамического лага с расположенными датчиками давления

Математическая модель распространения упругих волн в материале лага базируется на уравнениях линейной теории упругости. В декартовой системе координат движение сплошной среды описывается уравнением [14]:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \nabla \cdot \sigma + \mathrm{F}_V, \quad (1)$$

где ρ – плотность материала (кг/м³); $\boldsymbol{u} = (\boldsymbol{u}_x, \boldsymbol{u}_y, \boldsymbol{u}_z,)$ – вектор перемещений, м; $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напряжений (Па); $\mathbf{F}_V$ – вектор объёмных сил (Н/м³).

Для изотропного линейно-упругого материала связь между тензором напряжений и тензором деформаций определяется обобщённым законом Гука:

$$\sigma = \mathrm{C} : \varepsilon, \quad (2)$$

где **C** – тензор упругих постоянных, $\boldsymbol{\varepsilon}$ – тензор малых деформаций.

Тензор деформаций связан с вектором перемещений кинематическим соотношением:

$$\varepsilon - \frac{1}{2}[\nabla u + (\nabla u)^T] = 0. \quad (3)$$

Возбуждение ультразвуковых колебаний моделируется заданием гарм онического воздействия на участке клинкета:

$$u(t) = u_0 \sin(2\pi f t) \cdot e^{-\left(\frac{2(t-2T_0)}{T_0}\right)^2}, \quad (4)$$

где $\boldsymbol{u}_0$ – амплитуда перемещений, определяемая мощностью излучателя. Для типичных пьезоэлектрических преобразователей мощностью 50–100 Вт амплитуда перемещений составляет порядка 1–10 мкм; f = 30 кГц – частота ультразвука; T_0 – период колебания. Выбор частоты обоснован результатами экспериментальных исследований, показавших эффективность диапазона 20–50 кГц для подавления обрастания [15,16].

На внешней поверхности трубки, контактирующей с забортной водой, происходит излучение акустической энергии в окружающую среду. Давление в жидкости p удовлетворяет волновому уравнению:

$$\frac{1}{\mathrm{c}^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla^2 p = 0, \quad (5)$$

где c = 1500 м/с – скорость звука в воде.

На границе раздела «трубка-жидкость» выполняются условия непрерывности нормальных компонент скорости и напряжений:

$$\mathrm{n} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} = \mathrm{n} \cdot v_f, \quad \sigma \cdot \mathrm{n} = -p\mathrm{n}, \quad (6)$$

где **n** – вектор внешней нормали; $\boldsymbol{v}_f$ – скорость частиц жидкости.

На внутренней поверхности трубки задаётся условие свободной поверхности, т.к. приемная трубка гидродинамического лага внутри полая и заполнена воздухом, влиянием воздушной среды на динамику стенки пренебрегается:

$$\sigma \cdot \mathrm{n} = 0 \quad (7)$$

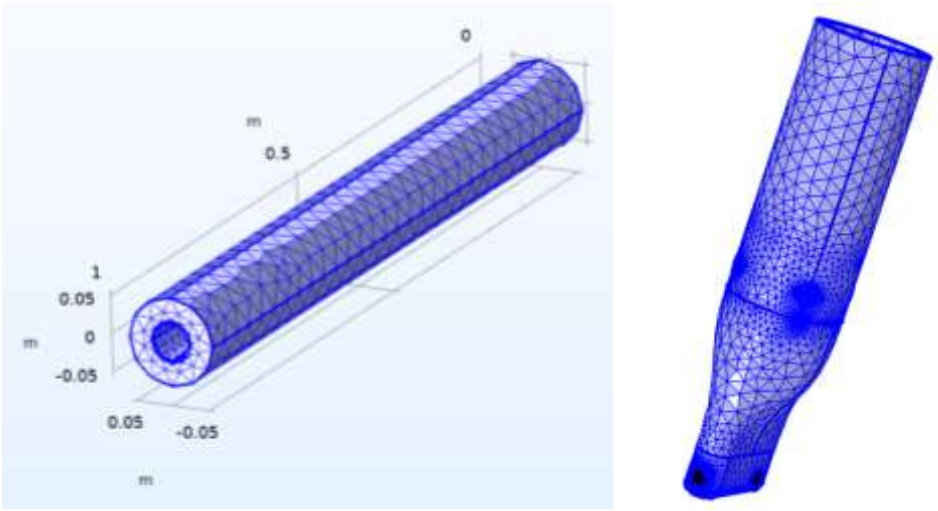
Уравнения (1)-(4) создают математическую модель распространения ультразвука по поверхности лага, выражения (5)-(7) являются граничными условиями.

Для численного решения сформулированной краевой задачи используется программный продукт COMSOL Multiphysics®, основанный на методе конечных элементов (МКЭ) [13]. Основная идея МКЭ заключается в дискретизации непрерывной области на конечные элементы и аппроксимации искомого решения на каждом элементе.

Дискретизация выполнена с использованием 10-узловых тетраэдральных элементов второго порядка (рис.4). Для обеспечения сходимости решения проведено

три последовательных измельчения сетки с коэффициентом 1,5. Количество элементов в финальной сетке – 124560, количество степеней свободы – 578932.

Цель расчета – определить характер распространения ультразвукового импульса от источника, условно расположенного у основания клинкета.



а) б)

а) Часть лага, выходящая из корпуса судна через клинкет
б) измерительная часть лага с расположенными чувствительными элементами

Рис. 4. Расчетная модель лага в COMSOL Multiphysics

Для описания распространения волн в твердом теле использовался модуль «Акустика твердых тел». Граничные условия на торцах трубки заданы как свободные. Источник возбуждения моделировался как нормальное ускорение на малой площадке, соответствующей месту крепления преобразователя. Форма сигнала представляла собой синусоидальный импульс с частотой *f*, модулированный гауссовой огибающей (рис. 5), что позволяет сконцентрировать энергию в узкой полосе частот и избежать резких фронтов.

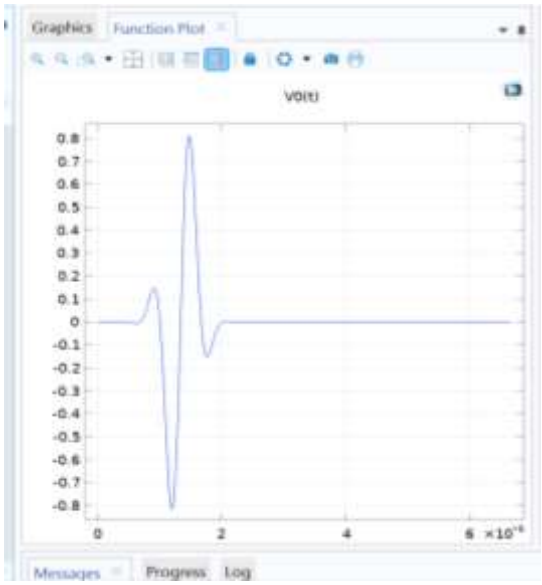


Рис. 5. Огибающая по Гауссу для ультразвукового импульса

Расчеты проводились для различных временных интервалов. Результаты моделирования (рис. 6 и 7) наглядно демонстрируют, что упругие волны от точечного источника эффективно распространяются по всей длине и поверхности трубки, не затухая полностью на исследуемом отрезке времени, равном 10 периодов колебания источника ультразвука. Это подтверждает, что одного излучателя, установленного в верхней части трубки, достаточно для создания кавитационного поля по всей рабочей поверхности, контактирующей с забортной водой.

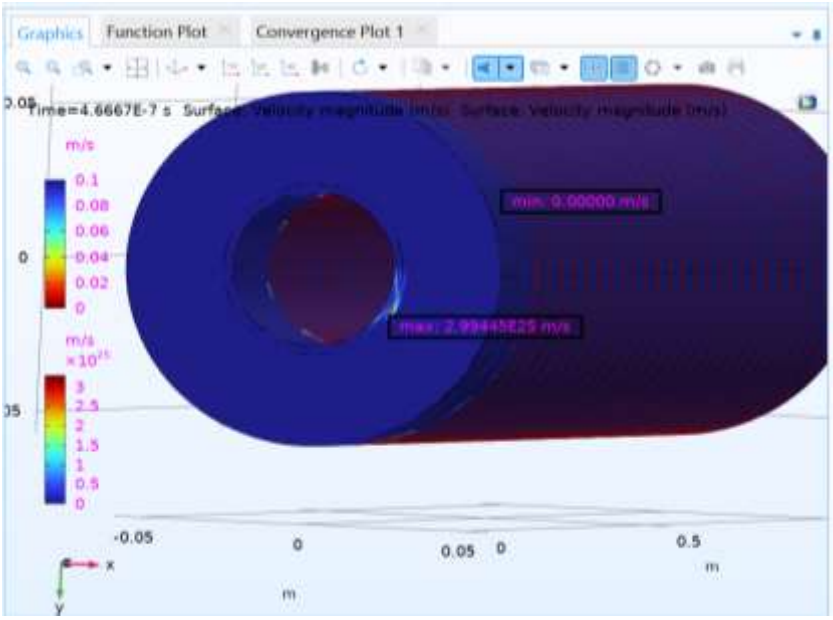


Рис. 6. Распространение ультразвукового импульса в 3D модели

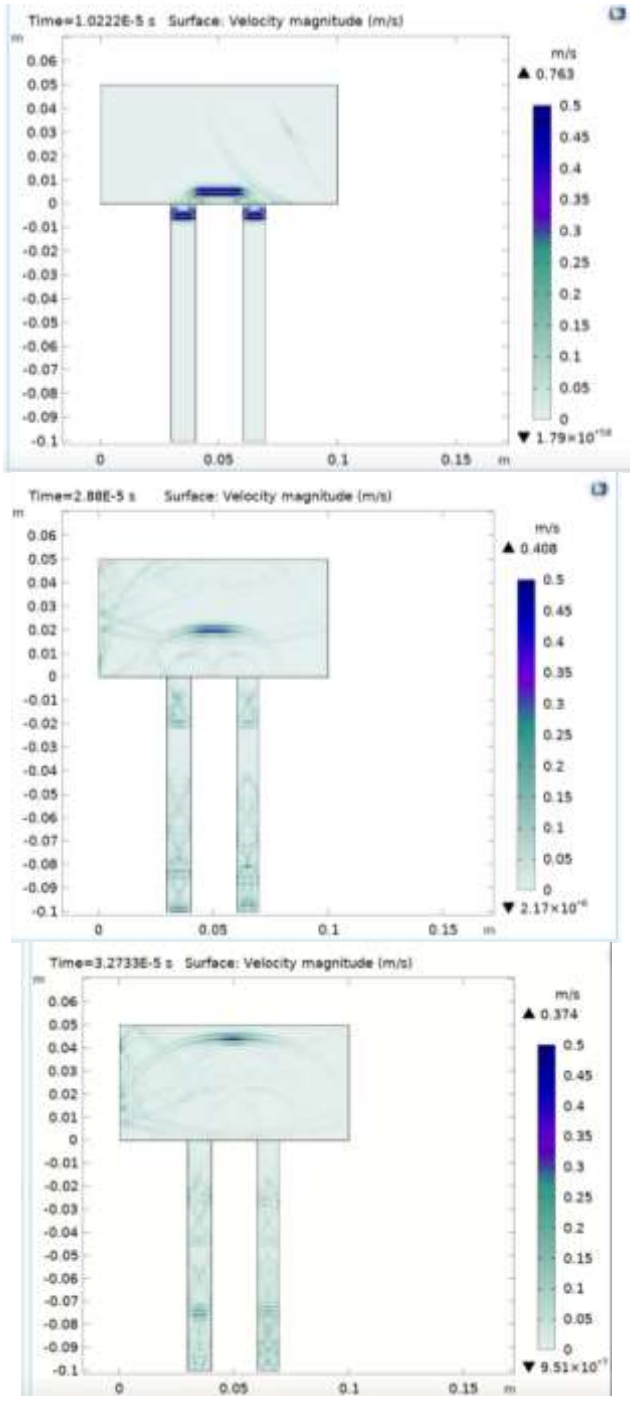


Рис. 7. Распространение волны в разрезе трубки в разный момент времени

Проведённое исследование в программном продукте COMSOL, наглядно показывает, как распространяется волна. Согласно моделированию, звуковая волна обладает достаточной энергией для обеспечения эффекта кавитации на всей площади

лага. При расположении источника ультразвука на клинкете (фланце выхода лага) распространение ультразвукового излучения происходит по всей поверхности трубки равномерно, таким образом реально использовать кавитационный метод для очистки лага от обрастания.

Заключение

В ходе исследования с использованием программного комплекса COMSOL Multiphysics была построена математическая модель распространения ультразвуковых волн в приемной трубке гидродинамического лага нового типа. Моделирование подтвердило равномерное распределение акустического поля по поверхности трубки при размещении одного излучателя в верхней части конструкции. Это доказывает техническую реализуемость компактной встроенной системы защиты.

Разработанная система не требует вмешательства в конструкцию лага, не выделяет вредных веществ и может работать автоматически. Внедрение таких систем позволит повысить точность навигационных измерений, сократить эксплуатационные расходы на очистку и докование. Направлением дальнейших исследований является экспериментальная проверка полученных модельных данных в лабораторных и натурных условиях.

Список литературы

1. Итенберг, С.И. Курс кораблевождения. Том 5, книга 3. Лаги и автосчислители / С.И. Итенберг, А.П. Дворников, И.В. Балашков. – Ленинград: [б.и.], 1964. – 548 с.
2. Технология очистки и окраски корпусов судов / А. А. Васильев, В. М. Левшаков, Н. П. Маслова, С. В. Морозов. – Санкт-Петербург : ЦТСС, 2015. – 269 с. – ISBN 978-5-902241-29-4.
3. Подводная технология / В.А. Коробков, В.С. Левин, А.В. Лукошков, П.П. Серебреницкий. – Л.: Судостроение, 1981. – 239 с.
4. Филимонова В.А. Методы борьбы с биологическими обрастаниями / В.А. Филимонова, Е.О. Харчевникова // Вологдинские чтения. – 2009. – № 76. – С. 129–131.
5. Donnelly B., Sammut K., Tang Y. Materials Selection for Antifouling Systems in Marine Structures // Molecules. – 2022. – Vol. 27, № 11. – P. 3408. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules27113408
6. Legg M., Yücel M.K., de Carellan I.G., Kappatos V., Selcuk C., Gan T.H. Acoustic methods for biofouling control: A review // Ocean Engineering. – 2015. – Vol. 103. – P. 237–247.
7. Kitamura H., Takahashi K., Kanamaru D. Inhibitory effect of ultrasonic waves on the larval settlement of the barnacle Balanus amphitrite in the laboratory // Marine Fouling. – 1995. – Vol. 12, № 1. – P. 9–13.
8. Гуревич, Е.С. Морское обрастание и борьба с ним / Е.С. Гуревич, Е.В. Александрова, С.В. Максимова, Т.Н. Тасуна. – М.: Воениздат, 1957. – 504 с.
9. Mazue G., Viennet R., Hihn J.Y., Carpentier L., Devidal P., Albaina I. Large-scale ultrasonic cleaning system: design of a multi-transducer device for boat cleaning (20 kHz) // Ultrasonics Sonochemistry. – 2011. – Vol. 18, № 4. – P. 895–900.
10. Guo S., Lee H.P., Khoo B.C. Inhibitory effect of ultrasound on barnacle (Amphibalanus amphitrite) cyprid settlement // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. – 2011. – Vol. 409, № 1–2. – P. 253–258.
11. Патент RU 2837729 C2 Российская Федерация, G01P 5/14. Гидродинамический лаг : № 2023113865 : заявл. 27.05.2023 : опубл. 03.04.2025 // Антонов А.А., Куценко В.А., Артемьев А.В., Горшков А.А. ; Патентообладатели: Аракелян А.А. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=80657322– Текст электронный.
12. Перспективы развития судовых относительных измерителей скорости / Антонов, А. А.; Артемьев, А. В.; Дробышева, О. О. // Морские Исследования на Дальнем Востоке : Сборник Докладов VII Научно-Практической Конференции, Владивосток, 19 Ноября 2024 г. – Владивосток : МГУ им. адмирала Г.И. Невельского, 2024. – С. 122–126.
13. Сиротюк, М.Г. Акустическая кавитация / М.Г. Сиротюк. – М.: Наука, 2008. – 271 с.
14. Ландау Л.Д. Теоретическая физика: В 10 т. Т. VII: Теория упругости / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Физматлит, 2003. – 264 с.

15. Seth N., Chakravarty P., Khandeparker L., Anil A.C., Pandit A.B. Quantification of the energy required for the destruction of Balanus amphitrite larva by ultrasonic treatment // Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom. – 2010. – Vol. 90, № 7. – P. 1475–1482.
16. Habibi H., Gan T.H., Legg M., Garcia de Carellan I., Kappatos V., Tzitzilonis V., Selcuk C. An acoustic antifouling study in sea environment for ship hulls using ultrasonic guided waves // International Journal of Engineering Technologies and Management Research. – 2016. – Vol. 3, № 4. – P. 14–30.

References

1. Itenberg, S.I. Kurs korablevozhdeniya. Volume 5, Book 3. Lagi i avtoschisliteli / S.I. Itenberg, A.P. Dvornikov, I.V. Balashkov. – Leningrad: [s.n.], 1964. – 548 p.
2. Tekhnologiya ochistki i okraski korpusov sudov / A. A. Vasiliev, V. M. Levshakov, N. P. Maslova, S. V. Morozov. – Saint Petersburg: CSTS, 2015. – 269 p. – ISBN 978-5-902241-29-4.
3. Podvodnaya tekhnologiya / V.A. Korobkov, V.S. Levin, A.V. Lukoshkov, P.P. Serebrenitsky. – L.: Sudostroenie, 1981. – 239 p.
4. Filimonova V.A. Metody borby s biologicheskimi obrastaniyami / V.A. Filimonova, E.O. Kharchennikova // Vologdinsky Readings. – 2009. – № 76. – P. 129–131.
5. Donnelly B., Sammut K., Tang Y. Materials Selection for Antifouling Systems in Marine Structures // Molecules. – 2022. – Vol. 27, № 11. – P. 3408. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules27113408
6. Legg M., Yücel M.K., de Carellan I.G., Kappatos V., Selcuk C., Gan T.H. Acoustic methods for biofouling control: A review // Ocean Engineering. – 2015. – Vol. 103. – P. 237–247.
7. Kitamura H., Takahashi K., Kanamaru D. Inhibitory effect of ultrasonic waves on the larval settlement of the barnacle Balanus amphitrite in the laboratory // Marine Fouling. – 1995. – Vol. 12, № 1. – P. 9–13.
8. Gurevich, E.S. Morskoe obrastanie i borba s nim / E.S. Gurevich, E.V. Alexandrova, S.V. Maksimova, T.N. Tasuna. – M.: Voenizdat, 1957. – 504 p.
9. Mazue G., Viennet R., Hihn J.Y., Carpentier L., Devidal P., Albaina I. Large-scale ultrasonic cleaning system: design of a multi-transducer device for boat cleaning (20 kHz) // Ultrasonics Sonochemistry. – 2011. – Vol. 18, № 4. – P. 895–900.
10. Guo S., Lee H.P., Khoo B.C. Inhibitory effect of ultrasound on barnacle (Amphibalanus amphitrite) cyprid settlement // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. – 2011. – Vol. 409, № 1–2. – P. 253–258.
11. Patent RU 2837729 C2 Russian Federation, G01P 5/14. Gidrodinamicheskiy lag: № 2023113865 : appl. 27.05.2023 : publ. 03.04.2025 / Antonov A.A., Kutsenko V.A., Artemyev A.V., Gorshkov A.A. ; Proprietor: Arakelyan A.A. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=80657322 – Text electronic.
12. Perspektivy razvitiya sudovykh otnositelnykh izmeriteley skorosti / Antonov, A. A.; Artemyev, A. V.; Drobysheva, O. O. // Marine Research in the Far East : Collection of Reports of the VII Scientific-Practical Conference, Vladivostok, November 19, 2024. – Vladivostok : MSU named after adm. G.I. Nevelskoy, 2024. – P. 122–126.
13. Sirotyuk, M.G. Akusticheskaya kavitatsiya / M.G. Sirotyuk. – M.: Nauka, 2008. – 271 p.
14. Landau L.D. Teoreticheskaya fizika: In 10 vols. Vol. VII: Theory of Elasticity / L.D. Landau, E.M. Lifshitz. – M.: Fizmatlit, 2003. – 264 p.
15. Seth N., Chakravarty P., Khandeparker L., Anil A.C., Pandit A.B. Quantification of the energy required for the destruction of Balanus amphitrite larva by ultrasonic treatment // Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom. – 2010. – Vol. 90, № 7. – P. 1475–1482.
16. Habibi H., Gan T.H., Legg M., Garcia de Carellan I., Kappatos V., Tzitzilonis V., Selcuk C. An acoustic antifouling study in sea environment for ship hulls using ultrasonic guided waves // International Journal of Engineering Technologies and Management Research. – 2016. – Vol. 3, № 4. – P. 14–30.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Бочарова Виктория Валерьевна, к.т.н., доцент кафедры радиоэлектроники и радиосвязи, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д. 50а, e-mail:bocharova@msun.ru

Victoria V. Bocharova, PhD, Associate Professor of the Department of Radio Electronics and Radio Communications, Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Verkhneportovaya St., 50a, 690059

Дробышева Ольга Олеговна, аспирант, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: drobysheva@msun.ru

Olga O. Drobysheva, Postgraduate Student, Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Verkhneportovaya St., 50a, 690059

Стадников Виктор Юрьевич, студент, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: victor01.02@yandex.ru

Victor Y. Stadnikov, student, Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Verkhneportovaya St., 50a, 690059

Антонов Александр Александрович, аспирант, Морской государственный университет имени адмирала Г.И.Невельского, 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: antonov@msun.ru

Alexander A. Antonov, Postgraduate Student, Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Verkhneportovaya St., 50a, 690059

Статья поступила в редакцию 07.05.2026; принята к публикации 10.08.2026; опубликована онлайн 20.09.2026. Received 07.05.2026; published online 20.09.2026.

УДК 372.862:629.5.01
DOI: 10.37890/jwt.vi88.721

Методология разработки модулей «Судовые устройства и системы» VR-тренажёра «Теория устройства судна» и применение в учебном процессе

С.В. Васькин
Е.А. Лукина
ORCID: 0000-0002-3834-2386
А.И. Самосюк
Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В данной работе рассматривается актуальный вопрос цифровой трансформации морского и речного образования через внедрение специализированных тренажерных комплексов на базе технологий виртуальной реальности (VR). Описана целеполагающая и исследовательская часть работы по созданию VR-тренажёра «Теория устройства судна», техническая составляющая реализации идеи и достигнутые результаты. Представлен подробный анализ интерактивных модулей «Судовые устройства и системы», разработанных в составе программно-аппаратного комплекса «Теория устройства судна». Описана структура и функциональные возможности модулей, входящих в состав VR-тренажера «Теория устройства судна». Рассматриваются технические и методические аспекты реализации виртуальных моделей грузовой системы, а также якорно-швартовного и шлюпочного устройств. В статье обосновывается преимущество использования VR-технологий для формирования профессиональных компетенций будущих членов экипажей судов и инженеров-кораблестроителей, что позволяет минимизировать риски и затраты, связанные с эксплуатацией реального судового оборудования в процессе обучения. Описаны сценарии интерактивных лабораторных работ и методы контроля знаний. повысить наглядность изучения сложных технических узлов.

Ключевые слова: цифровизация образования, VR-технологии, тренажерная подготовка, судовые системы, грузовая система, судовые устройства, якорно-швартовное устройство, шлюпочное устройство, интерактивное обучение, безопасность мореплавания

Methodology for developing the «Ship devices and systems» modules of the «Ship theory» VR simulator and their application in the educational process

Sergey V. Vas'kin
Evgeniya A. Lukina
ORCID: 0000-0002-3834-2386
Alina I. Samosyuk
Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. This paper discusses the current issue of digital transformation of maritime and river education through the introduction of specialized training systems based on virtual reality (VR) technologies. It describes the goal-setting and research aspects of the work on creating the VR simulator «Basic ship theory» as well as the technical implementation of the idea and the achieved results. The paper provides a detailed analysis of the interactive modules «Ship Devices and Systems» developed as part of the software and hardware

complex «Basic ship theory». It also describes the structure and functionality of the modules included in the VR simulator «Basic ship theory». The article discusses the technical and methodological aspects of implementing virtual models of the cargo system, as well as the anchor, mooring, and boat devices. The article substantiates the advantage of using VR technologies to form the professional competencies of future crew members and shipbuilding engineers.
Keywords: digitalization of education, VR technologies, training, ship systems, cargo system, ship devices, anchor and mooring device, boat device, interactive training, maritime safety.

Введение

Одним из основных направлений современной образовательной политики Российской Федерации в транспортной отрасли [1] является использование современных мультимедийных технических средств с целью повышения качества подачи и усвоения материала студентами и курсантами [2, 3].

Поэтому, в образовательных организациях, подведомственных Росморречфлоту, а также их удаленных филиалах и судоходных компаниях в настоящее время возникла потребность в учебно-методических и тренажёрных комплексах теоретической подготовки [4], в том числе с использованием технологий виртуальной и дополненной реальности.

Для подготовки студентов плавательных специальностей – будущих членов экипажей речных и морских судов, применение технологий виртуальной реальности – это эффективное решение ряда проблем в тренажерной подготовке [1]:

– во-первых, изучение устройства и принципов работы судовых устройств в некоторых случаях требует покупки дорогостоящего и массогабаритного оборудования;

– во-вторых, тренажерная подготовка не всегда обеспечивает возможность всестороннего рассмотрения объекта изучения.

Для студентов неплавательных специальностей возникают сложности с организацией изучения судовых систем и устройств на реальных судах и предприятиях. Они связаны с доступом на частные объекты и безопасностью. До настоящего времени посещение судов студентами в рамках ознакомительных практик осуществляются только по добровольному согласию владельцев, экипажей судов и диспетчеров портов, руководства предприятий. При этом они берут на себя ответственность за безопасность студентов на судне или предприятии в зонах расположения механизмов и оборудования.

К тому же в рамках этих практик студентам сложно усвоить большой объём специфической информации по детализации устройств и систем. В этом возникает неоднократная необходимость при освоении специальных дисциплин.

Именно поэтому разработка компьютерных обучающих систем для изучения крупногабаритных и дорогостоящих деталей транспортных средств на базе виртуальной и дополненной реальности является перспективным и экономически выгодным направлением [5, 6].

В 2023-2025 г.г. во ФГБОУ ВО «ВГУВТ» проведена разработка программно-аппаратного комплекса на базе сквозных цифровых технологий виртуальной и дополненной реальности [7] «Теория устройства судна» с интегрированными интерактивными модулями.

1. Методы реализации VR-тренажёра

Программно-аппаратный комплекс реализован [6, 7] с использованием современного комплекта средств виртуальной реальности HTC Vive Pro, игрового движка Unity и программного пакета Blender. Графические библиотеки дополнены детально проработанной 3D-моделю нефтеналивного судна, а также моделями его

элементов, систем и устройств с высокой степенью детализации. Это позволит студентам изучать оборудование в контексте реальной архитектуры судна.

Интерактивные модули спроектированы как многоуровневая система, включающая:

– геометрически точные модели механизмов и систем (трубопроводов, запорной арматуры, брашпилей, кнехтов, шлюпбалок);

– физический движок, имитирующий натяжение тросов, движение цепей и поведение судна на воде;

– интерфейс взаимодействия (контроллеры виртуальной реальности), имитирующий ручное управление стопорами, рукоятками и пультами.

После детальной проработки геометрии в VR-тренажёре в настоящее время реализована работа интерактивных модулей в режиме изучения терминологии и тестирования по определениям элементов судна, систем и устройств.

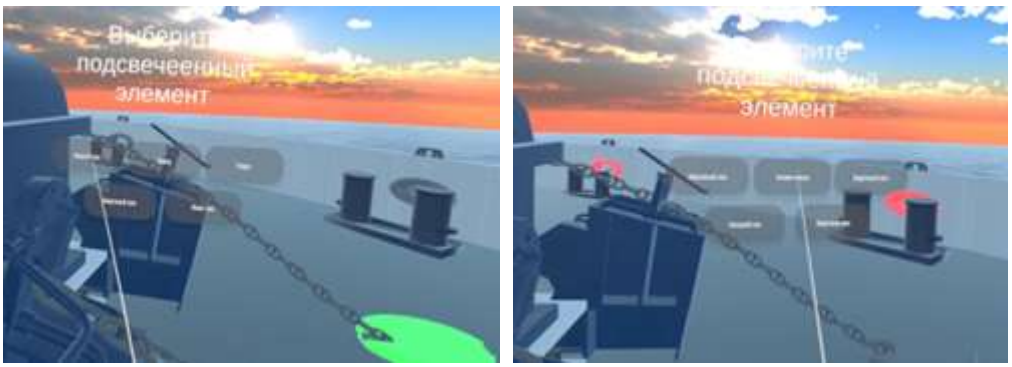
2. Результаты разработки отдельных интерактивных модулей

2.1 Якорно-швартовное устройство

Виртуальное 3х-мерное якорно-швартовное устройство, состоит из брашпиля, кнехтов, вьюшек, клюзов, киповых планок, штатно расположенных на судне заданного типа и водоизмещения.

Алгоритмы работы виртуального якорно-швартовного устройства обусловлены необходимостью отработки навыков плавсостава во время проведения постановки судна на якорную стоянку, снятия с якоря, швартовки к причалу или другому судну.

Тестовые задания построены по принципу необходимости выбора верного названия элемента якорно-швартовного устройства. Например, на сцене «подсвечен» швартовный клюз (рис.1). На экране надпись с заданием «Выберите подсвеченный элемент:» и вариантами ответов: швартовный клюз; киповая планка; швартовный кнехт; смотровой люк. При выборе верного варианта ответа элемент подсвечивается зелёным цветом, неверного – красным.



а) б)

Рис. 1. Пример задания с выбором верного (а) и неверного (б) варианта ответа

Тестовые задания по якорно-швартовному устройству содержат 18 определений элементов и по 4 варианта неверных ответов к каждому элементу.

Также возможны варианты заданий по типу: «Укажите элемент «Брашпиль». Обучающийся должен навести джойстик и подсветить верный элемент.

2.2 Модуль «Шлюпочное устройство»

К реализации в VR-тренажёре принята закрытая шлюпка свободного падения [8, 9]. Шлюпочное устройство в этом случае состоит из рамной конструкции, смонтированной на двух палубах по высоте в кормовой части судна и включающей, в том числе, подвижные элементы; закрытой самоходной шлюпки; элементов управления. Для обеспечения спускоподъёмной функции устройство оборудовано электро-гидравлической системой с пультом управления, оснасткой, лебёдкой и другими элементами.

Разработана поэлементная 3D-геометрия в следующем объёме (см. рисунок 2):

1. Посадочная площадка перед кормовой дверью шлюпки. Кормовая часть верхней (шлюпочной) палубы. С боковых сторон площадка обнесена быстросъёмным леерным ограждением.
2. Наружные элементы шлюпки: кормовая дверь, люки, окна, поручни, спецсимволы, подъёмные кольца, гаки, тросы, спасательные лини, орошающая система, навигационные огни, спусковой крюк и все элементы его отдачи – основные и аварийные, подъёмные крюки, проушины.
3. Внутреннее устройство шлюпки: посадочные места, ремни безопасности, люки, клапаны, рычаги, пульт управления, двигатель, баллоны с воздухом, рулевое управление, системы, движитель, рукоятки. От входной двери просматривается внутреннее пространство шлюпки.
4. Прорисовка элементов электро-гидравлической системы на палубе, на шлюпбалке, на шлюпке.

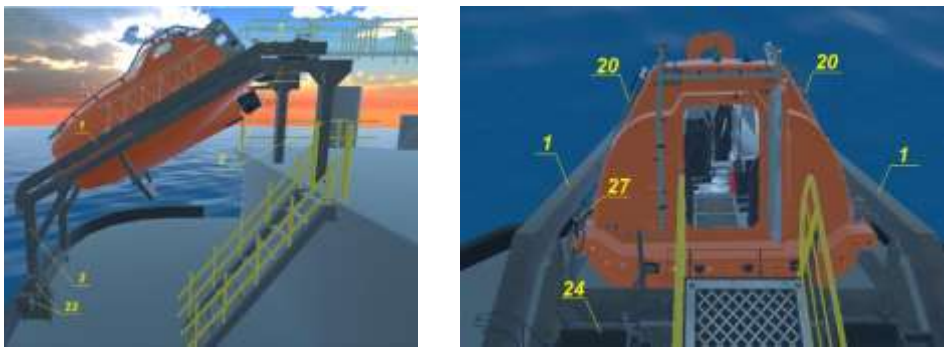


Рис. 2. Модель шлюпочного устройства

Разработанная виртуальная модель позволяет изучать основные элементы шлюпочного устройства и их взаимодействие при операциях по подготовке, спуску и подъёму шлюпки.

На данном этапе на модели «Шлюпочное устройство» реализована работа в режиме тестирования. Сформирована база из 30 элементов шлюпочного устройства. К каждому элементу определён список из 5ти вариантов ответа, включая правильный.

Система формирует индивидуальный вариант теста, выстраивая вопросы (подсвеченные элементы шлюпки) случайным образом, и также «перемешивает» порядок вариантов ответов в каждом вопросе.

Дальнейшее развитие VR-модели шлюпочного устройства в части динамики и взаимодействия всех элементов спускоподъёмного устройства; гидравлической системы управления; внутреннего устройства шлюпки – позволит поставить лабораторные работы по темам:

1) «Подготовка к оставлению судна»;

2) «Спуск шлюпки методом свободного падения»;

3) «Спуск шлюпки на лопарях»;

4) «Управление спасательной шлюпкой, подъём людей с воды и буксировка спасательных плотов»;

5) «Подъём шлюпки из воды и её закрепление на спускоподъёмном устройстве».

Сценарии лабораторных работ в модуле «Шлюпочное устройство» были разработаны на основе материалов:

– курса ФГБОУ ВО «ВГУВТ» «Специалист по спасательным шлюпкам и плотам»;

– Международный кодекс по спасательным средствам (Кодекс КСС/LSA);

– РКО ПКПС Часть V «Судовые устройства и снабжение»;

– РКО НД №2-020101-171 Правила по оборудованию морских судов;

– Конструкторский документ «Спасательные средства и устройства. Методика швартовных и ходовых испытаний».

2.3 Модуль «Судовые системы»

Поскольку в качестве прототипа моделируемого судна был выбран танкер, при разработке модуля «Судовые системы» принято решение воспроизвести ряд специальных систем, характерных для нефтеналивных судов:

– грузовую и зачистную систему;

– систему мойки танков;

– газоотводную систему.

– Указанный выбор обусловлен следующими факторами:

– высокой частотой использования систем при эксплуатации судна (особенно для грузовой и зачистной систем);

– значительным количеством разнообразных элементов в составе каждой системы;

– наличием множества режимов (вариантов) работы;

– прямым влиянием на безопасность эксплуатации судна.

Среди перечисленных систем наибольшее внимание уделено грузовой системе, поскольку её неправильная эксплуатация способна привести к аварийным и чрезвычайным ситуациям. На наливных судах применяются грузовые системы различных типов: с кольцевой или линейной магистралью, с переборочными клинкетами, туннельного типа, а также с погружными насосами.

В последнее время танкеры относительно небольшой грузоподъемности (до 15–20 тыс. т) оснащаются преимущественно системами с погружными насосами. К достоинствам таких систем относятся:

– отсутствие всасывающих трубопроводов;

– стабильность процесса выдачи груза;

– сокращение объема не удаляемого остатка в грузовых танках;

– отсутствие необходимости в установке специальных зачистных насосов [10, 11].

Расположение всех основных трубопроводов на главной палубе судна, характерное для грузовых систем данного конструктивного типа, существенно облегчает изучение студентами состава, устройства и принципа действия системы.

Для проведения лабораторных работ разработана виртуальная модель грузовой и зачистной систем, включающая следующие элементы:

– приводы грузовых насосов;

– грузовые и зачистные трубопроводы;
– поворотные затворы с ручным и электроприводом;
– приводы перепускных клинкетных задвижек;
– палубные элементы (сходные люки, стационарные моечные машинки и др.).

Трехмерные модели систем созданы на основе эскизов и чертежей отдельных элементов. Примеры таких моделей показаны на рисунках 3–6.

Проектирование конструкции велось с учётом требований нормативной документации [3, 8, 12, 13] и включало разработку принципиальных схем, трассировку трубопроводов, компоновку оборудования, расчёт производительности насосов и диаметров трубопроводов.

Изображение некоторых элементов систем в составе тренажера представлено на рис. 7 и 8.

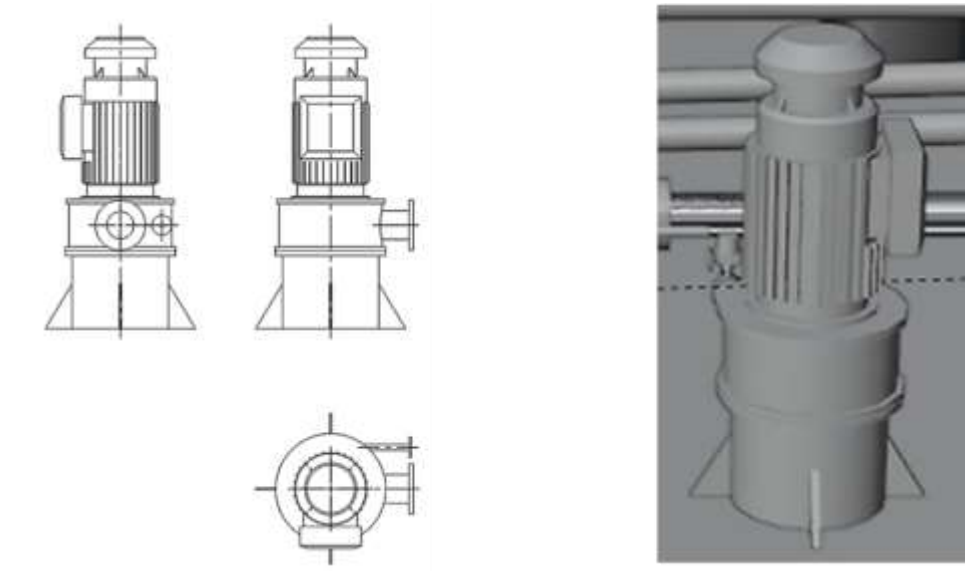


Рис. 3. Эскизы и трехмерная модель двигателя грузового насоса судна



Рис. 4. Эскизы и трехмерная модель сходного люка в грузовой танк

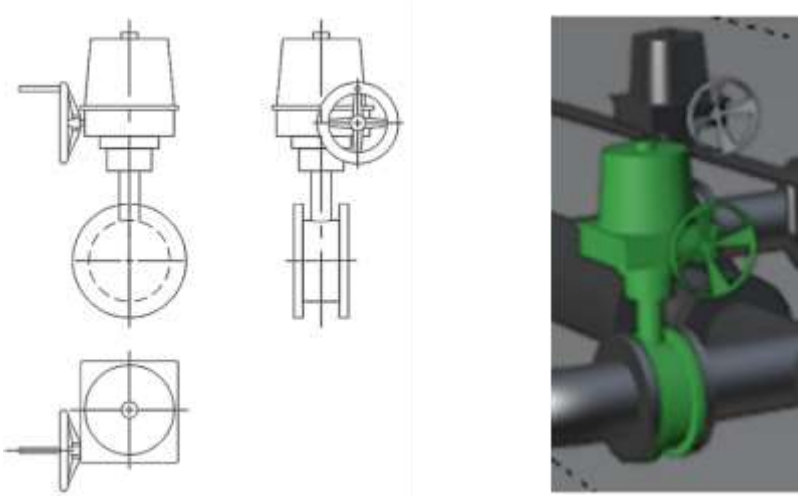


Рис. 5. Эскизы и трехмерная модель поворотного затвора с электроприводом

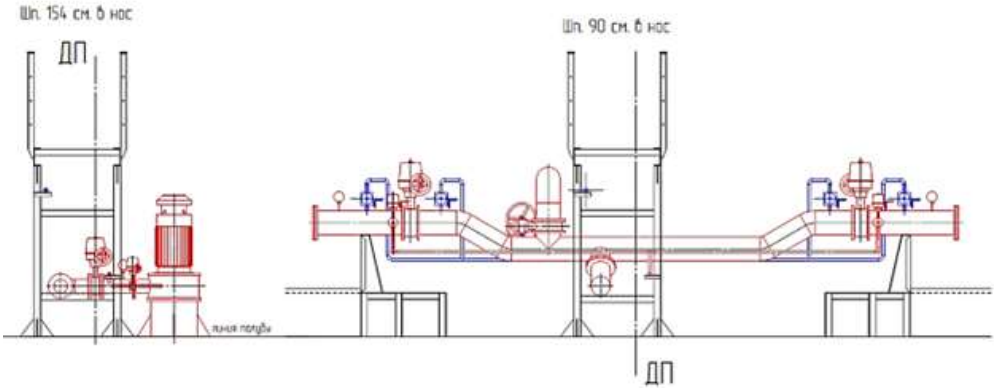


Рис. 6. Трассировка трубопроводов грузовой и зачистной системы
в районе грузового насоса и манифольда

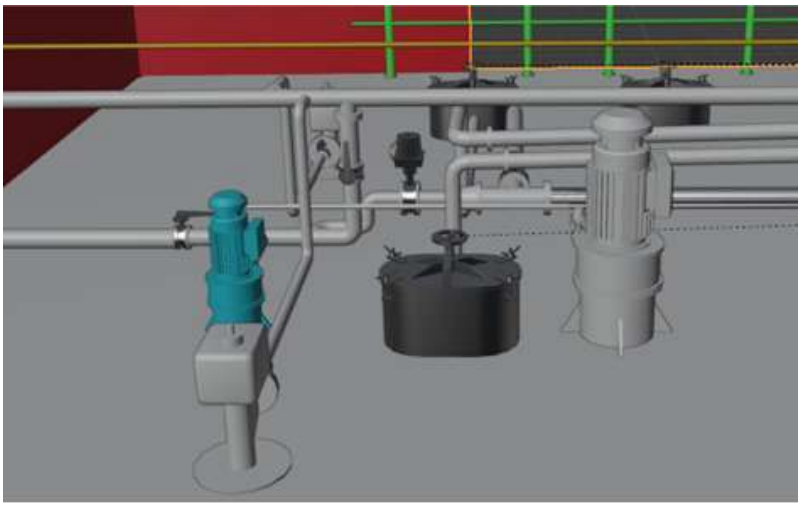


Рис. 7. Фрагмент внешнего вида тренажера с элементами систем в кормовой части грузовой зоны

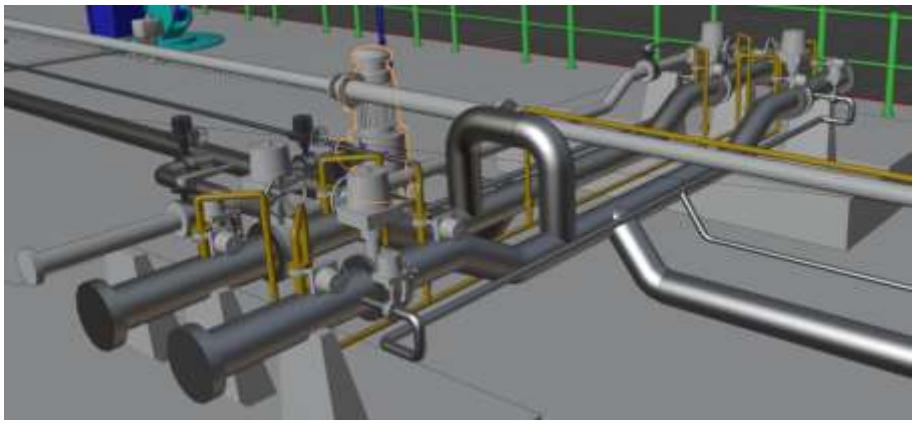


Рис. 8. Фрагмент внешний вида тренажера в районе манифольда

Для обеспечения функциональности в устройстве грузовой системы предусмотрена возможность имитации следующих режимов работы:

– приема или выгрузки одного или двух сортов груза одновременно;

– выгрузки с задействованием всех либо части грузовых насосов;

– приема и выдача груза с любого борта через один или оба трубопровода манифольда;

– зачистки магистралей от остатков нефтепродуктов после завершения грузовых операций.

– Методика работы с модулем состоит из двух частей.

Первая часть (ознакомительная) предназначена для объяснения конструкции систем, расположения и назначения элементов. Контроль усвоения материала осуществляется в форме тестирования, включающего задания на демонстрацию местоположения элементов непосредственно на тренажере. По устройству грузовой и зачистной системы разработано 30 вопросов, которые сгруппированы в отдельные тестовые задания по 5 вопросов.

Вторая часть (практическая) направлена на формирование навыков эксплуатации. Обучающиеся осваивают последовательность действий экипажа при выполнении грузовых операций в различных режимах. Для этого модуль должен быть дополнен виртуальной моделью пульта управления грузовыми и балластными операциями. В процессе имитации работы систем предусмотрена возможность эмуляции отказов элементов для отработки действий в нештатных ситуациях. В этом случае обучающиеся, используя специальное оборудование (шлем, перчатки), могут осуществлять виртуальное перемещение по палубе судна и вручную управлять работой систем.

3. Образовательная ценность и интеграция в учебный процесс

Разработанные модули «Судовые устройства: якорно-швартовное и шлюпочное» в формате тестирования могут быть внедрены в учебный процесс дисциплины «Теория и устройство судна» (направление подготовки 26.05.06, 26.05.07), «Судовые устройства и системы» (направление подготовки 26.05.01).

Для выполнения лабораторных работ обучающийся должен предварительно изучить состав шлюпочного устройства, функциональные возможности, его элементов, последовательность операций при использовании шлюпочного устройства с учётом техники безопасности в зависимости от заданной ситуации.

При работе с модулем «Судовые системы» на первоначальном этапе изучаются состав, устройство и режимы работы систем с использованием специально разработанных принципиальных схем.

Разработанные модули позволят реализовывать комплексные лабораторные работы для широкого круга специальностей. Для студентов плавательных направлений акцент делается на эксплуатационной составляющей и технике безопасности. Для студентов кораблестроительных специальностей VR-модуль открывает уникальные возможности по изучению монтажных схем. Это позволит студентам в рамках учебного процесса ознакомиться с порядком монтажа указанных устройств и систем на судне, виртуально присутствовать на швартовных и ходовых испытаниях, видеть процесс взаимодействия механизмов «изнутри».

Дальнейшее развитие проекта предполагает расширение библиотеки сценариев, включая работу с грузовыми устройствами и отработку действий при возникновении нештатных ситуаций (отказ гидравлики, заклинивание механизмов).

4. Заключение

Внедрение интерактивных модулей «Судовые системы» и «Судовые устройства» в учебный процесс ФГБОУ ВО «ВГУВТ» подтверждает эффективность использования технологий виртуальной реальности как средства повышения профессиональной подготовки. Переход от пассивного изучения чертежей к активному взаимодействию с трехмерными моделями оборудования позволяет значительно повысить уровень усвоения материала и готовность выпускников к реальной работе на флоте.

Реализация виртуальных моделей современных судовых устройств и систем отвечает целям подготовки экипажей судов, позволяет отрабатывать жизненно важные навыки использования судовых устройств, и выполнять предписанные действия.

Цифровая трансформация образовательной среды является залогом конкурентоспособности транспортного вуза и безопасности перевозок водным транспортом.

Список литературы

1. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года. – М., 2021. – Режим доступа: http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZlOOpQhLl0nUT91RjCbeR.pdf
2. Кодекс ПДНВ-78 с изменениями. – Режим доступа: https://base.garant.ru/2540787/
3. Правила классификации и постройки судов внутреннего и смешанного (река-море) плавания. Российское Классификационное Общество. – М., РКО, 2025.
4. Гагаев, С. Ю. Проблемы и перспективы развития внутреннего водного транспорта в Российской Федерации // Научный взгляд в будущее. – 2016. – Т. 1, № 2. – С. 46–50.
5. Воевудский, Е. Н. Экономико-математические методы и модели в управлении морским транспортом: учеб. для студентов морских вузов / Е. Н. Воевудский, Н. А. Коневцева, Г. С. Махуренко, И. П. Тарасова; под ред. Е. Н. Воевудского. – М.: Транспорт, 1988. – 384 с.
6. Попов, С. В., Малышев, Ю. С., & Бурмакин, О. А. (2025). Виртуальный тренажерный комплекс главной энергетической установки судна с винто-рулевой колонкой. Научные проблемы водного транспорта, (82), 87-98. https://doi.org/10.37890/jwt.vi82.580
7. Кириченко А. В., Зыкова А. А., Гетман В. Э. Технологии виртуальной и дополненной реальности в судостроении // Труды СПбГМТУ, 2022, Номер 4 (декабрь 2022). – Режим доступа: https://lki.smtu.ru/ru/article/94/

8. Российское Классификационное Общество. Правила по оборудованию морских судов. Часть II. Спасательные средства. – Москва: Российское Классификационное Общество, 2023. – Режим доступа: https://rfclass.ru/uploads/poms2_21-10-2024.pdf
9. Международный кодекс по спасательным средствам (Кодекс КСС/LSA). – 6-е изд. – СПб.: ЦНИИМФ. – Режим доступа: https://base.garant.ru/71516888/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/
10. Геец, В. М. Специальные системы наливных судов. Курс лекций: учеб. пособие / В. М. Геец. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2012. – 185 с.
11. Трусов А.С., Хайдуков О.П. Системы мойки танков морских танкеров: Конструкция, основы эксплуатации, перспективы развития: Учебное пособие. - Новороссийск: НГМА, 2002. – 68 с.
12. РД5Р.5452–80. Системы грузовая и зачистная наливных судов. Правила и нормы проектирования.
13. ГОСТ 5648-90. Трубопроводы судовые. Правила нанесения отличительных и предупреждающих знаков.

References

1. Transport Strategy of the Russian Federation for the period up to 2030 with a forecast up to 2035. – M., 2021. – Access mode: http://static.government.ru/media/files/
2. Code of the PDNV-78 with amendments. – Access mode: https://base.garant.ru/2540787/
3. Rules for the Classification and Construction of Inland and Mixed (River-Sea) Vessels. Russian Classification Society. – Moscow, RCO, 2025.
4. Gagaev, S. Yu. Problems and Prospects of Inland Water Transport Development in the Russian Federation // Scientific Outlook for the Future. – 2016. – Vol. 1, No. 2.
5. Voevudskiy, E. N. Economic and mathematical methods and models in marine transport management: textbook. for students of maritime universities / E. N. Voevudsky, N. A. Konevtseva, G. S. Makhurenko, I. P. Tarasov; edited by E. N. Voevudsky. – M.: Transport, 1988. – 384 p.
6. Popov, S. V., Malyshev, Yu. S., & Burmakin, O. A. (2025). Virtual training complex of the main power plant of a vessel with a propeller-rudder column. Scientific Problems of Water Transport, (82), 87-98. https://doi.org/10.37890/jwt.vi82.580
7. Kirichenko A. V., Zykova A. A., Getman V. E. Virtual and Augmented Reality Technologies in Shipbuilding // Proceedings of SPbGMTU, 2022, No. 4 (December 2022). – Access mode: https://lki.smtu.ru/ru/article/94/
8. Russian Classification Society. Rules for the Equipment of Sea Vessels. Part II. Life-Saving Appliances. – Moscow: Russian Classification Society, 2023. – Access mode: https://rfclass.ru/uploads/poms2_21-10-2024.pdf
9. International Code for Life-Saving Appliances (LSA Code). – 6th ed. – St. Petersburg: TsNIIMF. – Access mode: https://base.garant.ru/71516888/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/
10. Geets, V. M. Spetsial'nye sistemy nalivnykh sudov. Kurs lektsii : ucheb. posobie / V. M. Geets. – Vladivostok : Mor. gos. un-t, 2012. – 185 p.
11. Trusov A.S., Khaidukov O.P. Sistemy moiki tankov morskikh tankerov: Konstruktsiya, osnovy ehkspluatatsii, perspektivy razvitiya: Uchebnoe posobie. - Novorossiisk: NGMA, 2002. – 68 p.
12. RD5R.5452–80. Sistemy gruzovaya i zachistnaya nalivnykh sudov. Pravila i normy proektirovaniya.
13. GOST 5648-90. Truboprovody sudovye. Pravila naneseniya otlichitel'nykh i preduprezhdayushchikh znakov.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Васькин Сергей Владимирович, к.т.н., доцент, доцент кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности судов, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5,

Sergey V. Vas'kin, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Hydrodynamics, Ship Theory, and Economic Safety of Ships, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod,

e-mail: serwaskin@mail.ru

603951

Лукина Евгения Александровна, к.т.н., доцент, доцент кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности судов, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: gtkiebslukina@yandex.ru

Evgeniya A. Lukina, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Hydrodynamics, Ship Theory, and Economic Safety of Ships,, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Самосюк Алина Игоревна, к.т.н., доцент кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности судов, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: aliandrsam@gmail.com

Alina I. Samosyuk, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Hydrodynamics, Ship Theory, and Economic Safety of Ships, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 05.05.2026; принята к публикации 22.06.2026; опубликована онлайн 20.09.2026. Received 05.05.2026; published online 20.09.2026.

УДК: 629.5.083.5
DOI: 10.37890/jwt.vi88.736

О концепции разработки модельно-алгоритмического обеспечения цифровой системы поддержки принятия решений при оценке технического состояния корпуса судна

Д.А. Кирсанова
ORCID: 0009-0000-7346-0065
Л.Г. Орлова
ORCID: 0000-0002-0600-9562
А.В. Соловьев
ORCID: 0000-0002-6304-9739
Ю.С. Федосенко
ORCID: 0000-0002-9434-4386
Волжский государственный университет водного транспорта», г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В работе выполнено обзорное исследование по проблеме своевременной и достоверной оценки технического состояния корпуса сухогрузного водоизмещающего судна внутреннего и смешанного (река-море) плавания. Рассмотрена эволюция подходов от классических, регламентируемых правилами Российского классификационного общества (РКО) до современных вероятностных и риск-ориентированных вычислительных моделей. По результатам исследования обоснована востребованность разработки модельно-алгоритмического обеспечения цифровой системы поддержки принятия решений (СППР) при оценке технического состояния металлического корпуса сухогрузного водоизмещающего судна в процессе его освидетельствования, интегрирующей результаты инструментального контроля, ретроспективные данные об износе корпуса и экспертные суждения. Обоснован выбор комбинации метода анализа иерархий (МАИ) с мультипликативной свёрткой в качестве адекватного инструмента агрегирования независимых разнородных показателей износа и условий эксплуатации судна. Разработана концепция программно-алгоритмического обеспечения цифровой СППР, включающая трехуровневую иерархию критериев, процедуру парных сравнений экспертов, нормирование частных показателей. Предложенный подход направлен на повышение объективности освидетельствования металлического корпуса сухогрузного водоизмещающего судна внутреннего и смешанного (река-море) плавания и потенциально возможное продление срока безопасной его эксплуатации.

Ключевые слова: корпус судна, оценка технического состояния, система поддержки принятия решений, метод анализа иерархий

On the concept of developing model-algorithmic software for a digital decision support system for the technical condition assessment of a ship hull

Darya A. Kirsanova
ORCID: 0009-0000-7346-0065
Lyudmila G. Orlova
ORCID: 0000-0002-0600-9562
Alexey V. Soloviev
ORCID: 0000-0002-6304-9739
Yuriy S. Fedosenko
ORCID: 0000-0002-9434-4386

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract: This paper presents a review study on the problem of timely and reliable assessment of the technical condition of the hull of a dry cargo displacement vessel intended for inland and mixed (river-sea) navigation. The evolution of approaches is considered, from classical methods regulated by the rules of the Russian Classification Society (RCS) to modern probabilistic and risk-oriented computational models. Based on the results of the study, the need to develop model-algorithmic support for a digital decision support system (DSS) for assessing the technical condition of the steel hull of a dry cargo displacement vessel during its survey is substantiated, integrating the results of instrumental monitoring, retrospective data on hull wear, and expert judgments. The choice of a combination of the analytic hierarchy process (AHP) with multiplicative convolution is justified as an adequate tool for aggregating independent heterogeneous indicators of wear and vessel operating conditions. A concept of software-algorithmic support for a digital DSS is developed, including a three-level hierarchy of criteria, a pairwise comparison procedure for experts, and normalization of partial indicators. The proposed approach is aimed at increasing the objectivity of surveys of the steel hull of a dry cargo displacement vessel for inland and mixed (river-sea) navigation and potentially extending its safe service life.

Keywords: ship hull, technical condition assessment, decision support system (DSS), analytic hierarchy process (AHP)

Введение

Экономически эффективная эксплуатация судов внутреннего и смешанного (река-море) плавания неразрывно связана с необходимостью проведения освидетельствований для подтверждения их соответствия требованиям безаварийного плавания. Порядок, сроки и объёмы таких проверочных работ регламентируется Правилами Российского классификационного общества (РКО) [1].

Одной из основных процедур, выполняемых в процессе освидетельствования, является определение актуального состояния корпуса судна и прогнозирование динамики значений, характеризующих его износ и показатели деградационных процессов (коррозия, усталость) [2] в течение эксплуатационного периода.

В контексте вышесказанного данная статья посвящена анализу представленных в профильных научных исследованиях современных теоретических подходов к оценке состояния сложных технических объектов, обоснованию на базе результатов этого анализа концепции построения программно-алгоритмического обеспечения цифровой системы поддержки принятия решений при обследовании стальных корпусов водоизмещающих судов внутреннего и смешанного (река-море) плавания с целью оценки «потенциала их безаварийной эксплуатации».

В качестве задач исследования в статье рассматриваются следующие: а) анализ применяемых на практике методик исследования технического состояния стального корпуса сухогрузного водоизмещающего судна с опорой на нормативно-техническую базу РКО; б) анализ методов оценки технического состояния сложных систем (объектов), применяемых в смежных технических областях; в) разработка модельной концепции построения программно-алгоритмического обеспечения цифровой системы поддержки принятия решений при оценке технического состояния стального корпуса сухогрузного водоизмещающего судна внутреннего и смешанного (река-море) плавания.

Научная новизна результатов выполненного исследования заключается в разработке теоретических основ построения программно-алгоритмического обеспечения цифровой системы поддержки принятия решений (СППР) при оценке технического состояния стального корпуса сухогрузного водоизмещающего судна внутреннего и смешанного (река-море) плавания, интегрирующей результаты

инструментального контроля, ретроспективные данные об износе и экспертные суждения, согласованные с требованиями Российского классификационного общества (РКО).

Материалы и методы

Для решения сформулированных в предыдущем разделе задач и соответственно достижения поставленной цели в работе используется комплекс теоретических и прикладных методов, объединённых общей логикой поэтапного перехода от анализа актуального состояния предметной области к разработке собственной концепции построения модельно-алгоритмического обеспечения СППР и её последующей верификации.

На первом этапе выполнен системный анализ научных и нормативно-технических материалов, посвящённых проблематике надёжности корпусных конструкций сухогрузных водоизмещающих судов. Рассмотрены работы по математическому моделированию, вероятностным методам дефектации стальных корпусов судов, риск-ориентированному подходу, а также публикации, касающиеся применения методов нечёткой логики и искусственного интеллекта для прогнозирования технического состояния сложных систем и объектов. Одновременно изучались нормативно-технические документы РКО и Российского морского регистра судоходства (РМРС) в части периодичности, объёмов и методов освидетельствования стальных корпусных конструкций. Такой подход позволил выявить современные тренды в практике исследования технического состояния стальных корпусов судов внутреннего и смешанного (река-море) плавания и зафиксировать барьеры, препятствующие внедрению цифровых компонентов в процессы освидетельствования судов.

Результаты

Анализ научной литературы по теме показал, что теоретические подходы к оценке состояния стального корпуса сухогрузного водоизмещающего судна прошли длительный путь эволюции от трудоемких детерминированных расчетных методов к гибким вероятностным и риск-ориентированным процедурам. В частности, ныне повсеместно применяемые классические методы исследования технического состояния корпусов судов рассматриваемого типа основываются на визуальном и измерительном контроле с применением ультразвуковой толщинометрии, дефектоскопии и последующей оценке соответствия предельно допустимых износов нормативной базе РКО.

Выполненный в работе [3] сравнительный анализ правил РКО и РМРС показал, что несмотря на высокую степень детализации, существующие технологии проведения освидетельствования требуют значительных временных и финансовых затрат и не всегда позволяют прогнозировать динамику развития дефектов в корпусе судна в эксплуатационных условиях.

С целью снижения значимости указанных временных и финансовых ограничений в работе [4] предложен вероятностный подход к дефектации корпуса судна, позволяющий сократить количество физических измерений за счет реализации предварительного расчетного, так называемого «нулевого этапа в судоремонте». Показано, что полученные на этом этапе прогнозные значения остаточных толщин во всех случаях меньше им соответствующих результатов физических измерений остаточных толщин. Соответственно предложенный подход позволяет более точно спрогнозировать объемы ремонтных работ и выбрать наиболее целесообразный способ восстановления корпусных конструкций.

Близкий к вышеизложенному, вероятностный, подход был представлен в работе [5] в рамках концепция управления техническим состоянием корпуса судна на основе оценки риска. В отличие от детерминированных методов оценки риск-

ориентированный подход позволяет ранжировать элементы корпуса судна по вероятностям и последствиям отказов и на этой основе разрабатывать приоритетные программы контроля, планировать необходимый объем ремонтных работ.

Благодаря интеграции с цифровыми технологиями реализация предложенных в работах [4,5] подходов становится практически возможной, позволяет прогнозировать состояние корпуса судна в процессе эксплуатации и унифицировать хранение, обработку данных о его техническом состоянии, способствуя: а) снижению общей трудоемкости работ и объемов непредвиденных расходов; б) повышению достоверности конечных результатов путем согласования данных физических замеров и численного моделирования.

Вместе с тем, рассмотренные выше вероятностные и риск-ориентированные подходы отличаются и рядом ограничений, поскольку они ориентированы на узкоспециализированные задачи [3-5] и не учитывают сложные взаимосвязи между различными видами повреждений и условиями эксплуатации. Кроме того оценка факторов риска, опираясь на не всегда согласованные экспертные суждения, остается субъективной.

В силу указанных обстоятельств представляется целесообразным формирование концепции модельно-алгоритмического обеспечения СППР при оценке эксплуатационного состояния корпуса судна, которая позволила бы объединить математическое моделирование процессов изменения прочностных характеристик, численную обработку данных эксплуатационного мониторинга и многокритериальную экспертную оценку остаточного ресурса корпусных конструкций.

В качестве теоретического базиса для такой СППР могут быть использованы методы интеллектуального анализа данных, отработанные, в том числе в задачах оценки технического состояния сложных систем и объектов в смежных областях.

Так, в работе [6] предложена «объяснимая интеллектуальная модель» для оценки состояния взлётно-посадочной полосы. В качестве математического фундамента в этой работе была выбрана теория нечётких множеств, позволившая в рамках каскадной продукционной парадигмы учесть для поэтапной оценки несколько десятков объединенных в группы независимых параметров, характеризующих изучаемый сложный объект. Преимущество такого подхода заключается в возможности формализовать экспертные знания в виде набора продукционных правил, а также в прозрачности логики принятия решений, что критически важно для систем и объектов, функционирующих в зонах повышенной технической опасности. Естественно, что, как и у любой экспертной системы, её главным минусом является существенная трудоёмкость формирования базы знаний и необходимость постоянной актуализации этой базы по мере поступления новых данных.

По теме формализации экспертных знаний остановимся на методе анализа иерархий (МАИ), реализация которого наглядно продемонстрирована в задаче [7] расчёта «индекса технического состояния» мостового перехода. Данный индекс формируется путем аддитивной свёртки частных показателей, назначенных экспертами по результатам визуальных осмотров мостового перехода. В этой задаче МАИ как инструмент принятия решений в условиях оценочной многокритериальности играет ключевую роль при определении весового коэффициента значимости каждого из учитываемых компонентов мостового перехода.

В общем случае МАИ позволяет структурировать сложную многокритериальную оценочную проблему, системно сочетать качественные экспертные оценки с количественными расчётами, обеспечивать проверку согласованности суждений, гибко учитывать иерархическую структуру критериев. Процесс принятия решений при таком подходе становится прозрачным, способствуя повышению доверия к

объективности комплексной оценки состояния исследуемой системы (объекта). При этом основными преимуществами МАИ являются: а) формализация и преобразование экспертных оценок и данных технической диагностики в расчётные зависимости, б) системность и приспособленность инструментария МАИ к динамически изменяющимся режимам работы системы (объекта), в) возможность применения МАИ в разнообразных технических приложениях.

В сравнении с классическими методами применение МАИ отличает повышенная вычислительная сложность и требование к более детальной проработке системы иерархий, весовых коэффициентов значимости компонентов исследуемой системы (объекта) и их зависимость от состава экспертной группы, а также ориентация на статическое состояние, что затрудняет учёт динамики деградационных процессов.

Идейно схожая с МАИ методология используется в работе [7] для оценки технического состояния судовой энергетической установки (СЭУ). В её основе также лежит иерархическая декомпозиция СЭУ как системы, а определение весовых коэффициентов значимости составляющих её компонентов осуществляется путем парных сравнений с последующей свёрткой частных показателей в комплексную оценку состояния. Для свертки частных критериев, характеризующих техническое состояние подсистем СЭУ, используется мультипликативный оператор, что обусловлено спецификой СЭУ, тесными взаимосвязями её подсистем. Соответственно мультипликативная модель свертки в большей мере отражает эффект «слабого звена», когда снижение значения одного показателя не компенсируется избыточными значениями остальных.

В целом применение МАИ в условиях многокритериальности интеллектуального анализа данных для оценки технического состояния технической системы (объекта) предоставляет следующие возможности:

– формализация многокритериальной задачи и техника структуризации множества критериев в общую систему иерархий,

– выполнение расчетных процедур в условиях неопределённости и неполноты исходных данных,

– снижение уровня субъективности экспертных оценок вследствие прозрачности процедуры попарных сравнений и проверки согласованности весовых коэффициентов значимости различных компонентов,

– адаптация метода под различные проекты, объекты и типы систем.

С учетом перечисленных возможностей представляется целесообразным применение МАИ в сочетании с мультипликативной сверткой для расчёта комплексной оценки технического состояния корпуса судна.

Другие позволяющие работать с неопределённостью методы, в том числе реализующие нечёткие и нейросетевые подходы, требуют значительного объёма репрезентативных данных для обучения, отличаются недостаточной объяснимостью получаемых решений и могут играть вспомогательную роль либо применяться для уточнения полученных прогнозных значений показателей деградационных процессов и накапливания базы знаний. Соответственно указанные ограничения должны учитываться при разработке концепции модельно-алгоритмического обеспечения СППР.

Ниже на основе МАИ предложено общее описание концепции построения программно-алгоритмического обеспечения цифровой системы поддержки принятия решений при поэтапная комплексной оценке технического состояния стального корпуса судна.

Для наглядности описание приводится на примере стального корпуса сухогрузного водоизмещающего судна класса «О-ПР» массового проекта 507Б типа «Волго-Дон».

В качестве исходного базиса разрабатываемая концепция опирается на паспортные характеристики судна и архивные массивы данных: а) периодических замеров толщин элементов набора и обшивки, б) по маршрутам плавания, в) по условиям эксплуатации, в) по ранее проведенным ремонтам и заменам элементов корпуса судна.

Для количественной оценки степени влияния каждого из входных параметров на комплексный показатель $КП_{ТС}$ используется процедура парного сравнения выбранных экспертами частных показателей оценки технического состояния корпуса судна. По необходимости в целях достижения консенсуса между несколькими экспертами осуществляется усреднение значений соответствующих показателей.

На рис. 1 представлена общего вида трехуровневая иерархическая схема группировки показателей для оценки технического состояния корпуса судна, выполненная соответственно их природе и логике решаемой задачи.

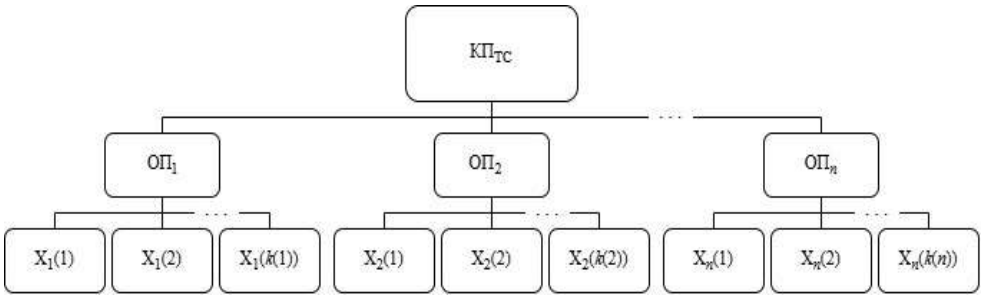


Рис. 1. Трехуровневая иерархическая структура группировки частных показателей для оценки технического состояния корпуса судна

Каждый обобщенный показатель $ОП_i\ (i = \overline{1,n})$ через группу соответствующих ему частных показателей из совокупности

$X_1(1),\ X_1(2), \dots, X_1\big(k(1)\big),\ X_2(1), X_2(2), \dots X_2\big(k(2)\big), \dots, X_n(1), X_n(2), \dots, X_n\big(k(n)\big)$

$X_s(p) \neq X_r(q)$ при $r \neq s,\ \ r,s = \overline{1,n},\ \ p,q = \overline{1, \max\{k_i\}}$ при $i = \overline{1,n}$

описывает сущностную характеристику корпуса судна и определяется через мультипликативную свертку нормированных значений $ЧП_j^{b_j}$ частных показателей по формуле

$$ОП_i = \prod_{j=1}^{k(i)} ЧП_j^{b_j},\ (\ i = \overline{1,n}), \qquad (1)$$

где b_j – весовой коэффициент $ЧП_j$.

В качестве примера ниже в табл. 1 приведен перечень частных показателей судна для корпуса судна «Волго-Дон».

Комплексный показатель технического состояния корпуса судна $КП_{ТС}$ определяемый совокупностью обобщенных показателей $ОП_i\ (i = \overline{1,n})$, принимает значения на замкнутом интервале [0, 1]. Нулевое значение $КП_{ТС}$ соответствует критическому состоянию корпуса судна, при котором дальнейшая эксплуатация судна исключается, а $КП_{ТС} = 1$ соответствует полностью исправному, новому или прошедшему капитальный ремонт корпусу.

Таблица 1

Обобщенный показатель	Физическое содержание частных показателей
фактического износа $ОП_1$	Средняя скорость изнашивания скулового пояса и прилегающей к нему днищевой обшивки в выбранных сечениях
	Средняя скорость изнашивания бортовой обшивки в выбранных сечениях
прочности $ОП_2$	Коэффициент запаса прочности по предельному моменту
	Отношение фактических толщин скулового пояса и прилегающей к ней днищевой обшивки в выбранных сечениях к проектным значениям
	Отношение фактических толщин скулового пояса и прилегающей к ней днищевой обшивки в выбранных сечениях к минимальным значениям
	Отношение фактических толщин бортовой обшивки в выбранных сечениях к проектным значениям
	Отношение фактических толщин бортовой обшивки в выбранных сечениях к минимальным значениям
эксплуатационных параметров $ОП_3$	Остаточный перегиб
	Переклассификация
	Наличие обновлений
условий эксплуатации $ОП_4$	Интенсивность эксплуатации
	Агрессивность среды

Мультипликативная свертка для расчета комплексного показателя $КП_{ТС}$ технического состояния корпуса судна определяется через обобщенные показатели $ОП_i$ $(i = \overline{1,n})$ по формуле

$$КП_{ТС} = \prod_{i=1}^{n} ОП_i^{a_i}, \quad (2)$$

где a_i – обобщенный весовой коэффициент.

Наличие коэффициентов a_i и b_j в формулах (1) , (2) обусловлено необходимостью корректного учёта неравнозначности частных и обобщенных характеристик при оценке технического состояния корпуса судна. Соответственно для достижения математической согласованности их суммы нормируются к 1. С целью определения численных значений a_i и b_j строятся матрицы парных сравнений на каждом уровне иерархии.

Экспертные суждения учитываются по результатам попарного сравнения элементов одной группы по шкале Саати (от 1 — равная важность, до 9 — абсолютное превосходство) [9]. При участии нескольких экспертов производится усреднение матриц парных сравнений поэлементно, после чего вычисляются усреднённые веса.

Также через экспертные суждения строится экспертная шкала, преобразующая отношение фактического значения к проектному (или нормативному) в безразмерную оценку. Выполняется эта процедура посредством шкалирования через аппроксимирующую кривую, что позволяет формализовать экспертное мнение в виде математической зависимости (рис. 2).

Существенным элементом разрабатываемой модели концепции является определение предельных значений, при которых техническое состояние корпуса признаётся неприемлемым для дальнейшей безопасной эксплуатации.

По рекомендации экспертов в области освидетельствования судовых корпусных конструкций характеристики сечений корпуса судна условно разделены на две

группы, а именно бортовую обшивку и скуловой пояс с прилегающей к нему днищевая обшивкой, поскольку именно в этих зонах сосредоточены наиболее ответственные элементы поперечного сечения корпуса, определяющие его общую продольную прочность и сопротивление изгибу. Кроме того, скуловой пояс и прилегающее днище принципиально отличаются от бортовой обшивки по условиям работы и скоростям деградации.

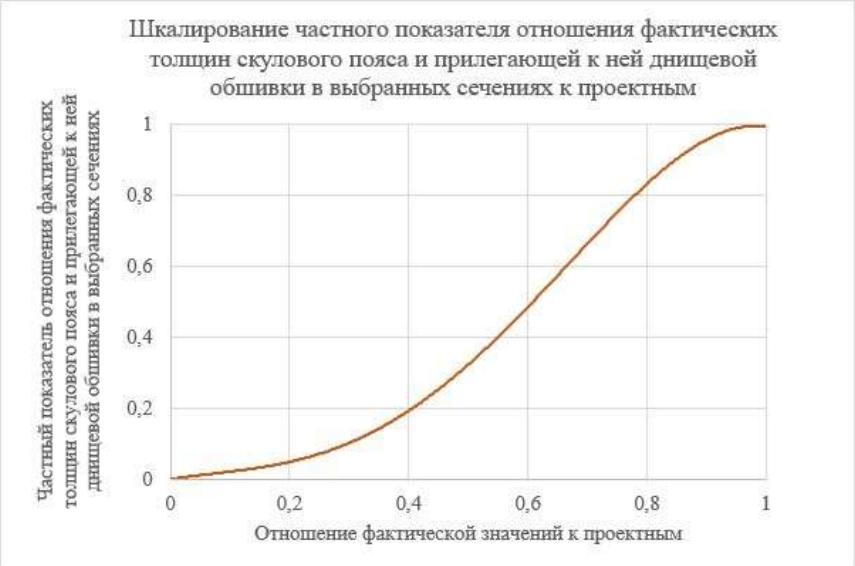


Рис. 2. Пример шкалирования частного показателя толщин скулового пояса и прилегающей к ней днищевой обшивки в выбранных сечениях

Путем анализа актов дефектации судна «Волго-Дон» с учетом правил классификации и постройки судов (ПКПС РКО) [10] было выделено четыре обобщённых показателя, два из которых $ОП_1$ и $ОП_2$ характеризуют фактический износ и прочность. Другие два показателя $ОП_3$ и $ОП_4$ определяются на основе информации о маршрутах движения судна и условиях плавания (включая интенсивность эксплуатации, агрессивность среды и т.д.). Эти показатели предназначены для количественной оценки эксплуатационных характеристик судна, отражая влияние внешних факторов на изменение его технического состояния [11].

Указанный ниже в табл. 1 перечень не является исчерпывающим и подлежит уточнению или расширению при дальнейших исследованиях по мере поступления новых данных и проведения вычислений.

В данной работе с учетом всех сечений, рассматривается 30 частных показателей. Выходными результатами функционирования СППР в актуальный момент времени являются оценка текущего технического состояния корпуса судна, прогноз его динамики на заданную временную перспективу (интервал от одного до пяти лет), а также формирование рекомендаций по эксплуатации судна.

Основная цель развиваемого в работе подхода – обеспечение объективной и своевременной оценки эксплуатационного состояния корпуса судна при проведении плановых и внеочередных освидетельствований, а также при решении вопроса о продлении срока службы

Разработанная комплексная модельная концепция программно-алгоритмического обеспечения цифровой системы поддержки принятия решений при оценке технического состояния корпуса судна предназначена для последующей реализации в

виде программного комплекса с возможностью адаптации к различным типам водоизмещающих судов.

Информационная структура СППР должна строиться по модульному принципу, позволяющему раздельно хранить данные оценки и формировать отчеты, согласованные с требованиями РКО. Естественно, входной поток данных СППР должен включать информацию по предыдущим освидетельствованиям и результаты экспертных расчетов.

Штатное применение СППР позволит заменить разрозненные бумажные акты дефектации единым цифровым решением, поддерживающим непрерывное риск-ориентированное управление техническим состоянием корпуса судна на протяжении его жизненного цикла.

Заключение

В результате системного анализа современных методов оценки технического состояния сложных систем в разных областях, включая вероятностные, риск-ориентированные и интеллектуальные подходы, выявлены и систематизированы основные ограничения существующих методик, среди которых: высокая трудоёмкость натурных измерений, неполнота исходных данных, субъективность экспертных оценок и недостаточная прогностическая способность.

Обоснован выбор МАИ, позволяющий в сочетании с мультипликативной свёрткой агрегировать разнородные показатели технического состояния корпуса в условиях многокритериального выбора решений при освидетельствовании судна.

Предложена поэтапная комплексная методика, включающая формирование иерархической структуры критериев, процедуру парных сравнений экспертов, нормирование и шкалирование показателей, аппроксимацию экспертных мнений в математическую зависимость, расчёт комплексной оценки и проверку браковочных значений [8].

В развитее темы статьи дальнейшие исследования предполагают получение статистически обоснованных численных результатов оценки технического состояния на ретроспективном массиве данных освидетельствования не менее 5–7 водоизмещающих судов разных проектов и разных сроков эксплуатации с последующей апробацией разработанной концепции, которая позволит верифицировать корректность иерархической модели, проверить чувствительность мультипликативной свёртки к вариациям значений весовых коэффициентов a_i и b_j , уточнить браковочные значения для конкретных конструктивных зон корпуса судна.

Дополнительного рассмотрения заслуживает сценарий, при котором один из обобщенных показателей становится близким к нулю (например, локальный недопустимый износ скулового пояса), а остальные обобщенные показатели остаются высокими, что вероятно потребует введение в вычислительную модель оценки технического состояния запрета на свёртку с выдачей отдельного диагностического сообщения.

Предложенная концепция программно-алгоритмического обеспечения СППР при оценке технического состояния металлического корпуса судна не является окончательной и может быть развита также в следующих направлениях: интеграция методов машинного обучения для автоматического уточнения значений a_i и b_j по мере накопления статистических данных; внедрение нечётких модификаций МАИ для работы с более высокими уровнями неопределённостей; создание полноценного цифрового двойника корпуса с двусторонней связью между расчётной моделью и данными непрерывного мониторинга.

Реализация перечисленных направлений теоретических и вычислительных исследований позволит перейти от теоретически обоснованной методологии к полнофункциональному цифровому инструменту, поддерживающему весь жизненный цикл управления техническим состоянием корпуса судна.

Список литературы

1. Правила освидетельствования судов в процессе их эксплуатации (ПОСЭ) // Российское классификационное общество (РКО). [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://rfclass.ru/uploads/ppzs/pose_rko_19-04-2026.pdf (дата обращения: 30.05.2026).
2. Петрова Н. Е. Изменение технического состояния корпуса судна в процессе эксплуатации // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2009. – Т. 12. – №1. – С. 39-41.
3. Зяблов О. К., Науменко А. Н. Сравнительный анализ правил РРР и РМРС в области освидетельствований и дефектации судов // Труды 19-го международного научно-промышленного форума «Великие реки-2018». – С. 7.
4. Красюк А. Б., Чистов В. Б., Никифоров В. Г. Надежность элементов корпусов судов речного флота //Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2023. – Т. 15. – №6. – С. 1041-1053.
5. Шон Х. М. Управление техническим состоянием конструкций корпуса судов в процессе эксплуатации на основе оценки рисков // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2013. – №1. – С. 71-77.
6. Сорокин А. А., Диденко Д. В. Формирование объяснимой интеллектуальной модели на основе иерархической нечеткой продукционной системы для анализа состояния участков взлетно-посадочной полосы //Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2025. – №1. – С. 82-100.
7. Wakchaure S. S., Jha K. N. Determination of bridge health index using analytical hierarchy process //Construction Management and Economics. – 2012. – Т. 30. – №2. – С. 133-149.
8. Соловьев А. В. Методология разработки единой системы автоматизированного управления объектами судовой энергетической установки и контроля их технического состояния: дис. д-р. 05.08.05, 05.13.06. - Нижний Новгород, 2018. - 305 с.
9. Саати Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1989. — 316 с.
10. Правила классификации и постройки судов (ПКПС) // Российское классификационное общество (РКО). [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://rfclass.ru/uploads/pkps/pkps_rko_vvedeny_v_dejstvie_s_16-11-2025.pdf (дата обращения: 30.05.2026).
11. Огнева В. В., Бурмистров Е. Г. Анализ факторов, определяющих скорость изнашивания корпусов судов внутреннего и смешанного (река-море) плавания // Статья /В.В. Огнева, Е.Г. Бурмистров // Труды конгресса 16-го Международного научно-промышленного форума «Великие реки-2018». – 2014. – С. 317-321.

References

1. Rules for Survey of Ships in Operation (RSSO). Russian Classification Society (RCS). Available at: https://rfclass.ru/uploads/ppzs/pose_rko_19-04-2026.pdf (accessed 30.05.2026). (In Russ.)
2. Petrova, N.E. Izmenenie tekhnicheskogo sostoyaniya korpusa sudna v protsesse ekspluatatsii [Change in the Technical Condition of a Ship's Hull during Operation]. Vestnik of MSTU, 2009, no. 1, pp. 39–41. (In Russ.)
3. Zyablov, O.K., Naumenko, A.N. Sravnitel’nyy analiz pravil RRR i RMRS v oblasti osvidetel’stvovaniy i defektatsii sudov [Comparative Analysis of the Rules of the Russian River Register and the Russian Maritime Register of Shipping in the Field of Surveys and Defectation of Vessels]. Proceedings of the 19th International Scientific and Industrial Forum “Great Rivers 2018”, 2018, p. 7. (In Russ.)
4. Krasyuk, A.B., Chistov, V.B., Nikiforov, V.G. Nadezhnost’ elementov korpusov sudov rechnogo flota [Reliability of Hull Elements of River Fleet Vessels]. Vestnik of Admiral S.O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 2023, no. 6, pp. 1041–1053. (In Russ.)
5. Hoang, M.S. Upravlenie tekhnicheskim sostoyaniem konstruktsiy korpusa sudov v protsesse ekspluatatsii na osnove otsenki riskov [Risk Based Management of the Technical Condition

of Ship Hull Structures during Operation]. Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology, 2013, no. 1, pp. 71–77. (In Russ.)
6. Sorokin, A.A., Didenko, D.V. Formirovanie ob''yasnimoy intellektual'noy modeli na osnove ierarkhicheskoy nechetkoy produktsionnoy sistemy dlya analiza sostoyaniya uchastkov vzletno posadochnoy polosy [Formation of an Explainable Intelligent Model Based on a Hierarchical Fuzzy Production System for Analyzing the Condition of Runway Sections]. Vestnik of Voronezh State University. Series: System Analysis and Information Technologies, 2025, no. 1, pp. 82–100. (In Russ.)
7. Wakchaure, S.S., Jha, K.N. Determination of Bridge Health Index Using Analytical Hierarchy Process. Construction Management and Economics, 2012, vol. 30, no. 2, pp. 133–149.
8. Solovyov, A.V. Metodologiya razrabotki edinoy sistemy avtomatizirovannogo upravleniya ob''ektami sudovoy energeticheskoy ustanovki i kontrolya ikh tekhnicheskogo sostoyaniya [Methodology for Developing a Unified Automated Control System for Marine Power Plant Objects and Monitoring Their Technical Condition]. Doctoral dissertation. Nizhny Novgorod, 2018. 305 p. (In Russ.)
9. Saaty, T.L. [Decision Making. The Analytic Hierarchy Process]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1989. 316 p. (In Russ.)
10. Rules for Classification and Construction of Ships (RCCS). Russian Classification Society (RCS). Available at: https://rfclass.ru/uploads/pkps/pkps_rko_vvedeny_v_dejstvie_s_16-11-2025.pdf (accessed 30.05.2026). (In Russ.)
11. Ogneva, V.V., Burmistrov, E.G. Analiz faktorov, opredelyayushchikh skorost' iznashivaniya korpusov sudov vnutrennego i smeshannogo (reka more) plavaniya [Analysis of Factors Determining the Wear Rate of Hulls of Inland and Mixed (River Sea) Navigation Vessels]. Proceedings of the 16th International Scientific and Industrial Forum "Great Rivers 2014", 2014, pp. 317–321. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/ INFORMATION ABOUT THEAUTHORS

Кирсанова Дарья Алексеевна, аспирант кафедры систем информационной безопасности управления и телеком-муникаций, «Волжский государственный университет водного транспорта» , 603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kirsanova_dasha@bk.ru

Darya A. Kirsanova, postgraduate student of the Department of Information Security Management and Telecommunications Systems, Volga State University of Water Transport, 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova str., 5

Орлова Людмила Георгиевна, к.филол.н., доцент кафедры иностранных языков и конвенционной подготовки, «Волжский государственный университет водно-го транспорта, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5,e-mail: orlova-436@mail.ru

Lyudmila G. Orlova, PhD in Philology, associate professor of the Department of Foreign Languages and Convention Training, Volga State University of Water Transport, 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova str., 5,

Соловьев Алексей Валерьевич, д.т.н., доцент, и.о. директора Верхне-Волжского филиала ФАУ »Российское Классификационное Общество», 603001, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, ул. Рождественская, 38в, e-mail: avsolovev@rfclass.ru

Alexey V. Soloviev, Dr.Sci.Tech, associate professor of the Department of Information Security Management and Telecommunications Systems, deputy director The Federal Autonomous Institute Russian River Register Upper Volga Branch-Office, 603001, Nizhniy Novgorod, Rozhdestvenskaya str., 38v,

Федосенко Юрий Семенович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой Систем информационной безопасности управления и телекоммуникаций, «Волжский государственный университет водного транспорта», 603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: fds1707@mail.ru

Yu.S. Fedosenko, Dr.Sci.Tech., professor, head of the Department of Information Security Management and Telecommunications Systems, Volga State University of Water Transport, 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova str., 5, e-mail: fds1707@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25.05.2026; принята к публикации 22.06.2026; опубликована онлайн 20.09.2026. Received 25.05.2026; published online 20.09.2026.

УДК 656.61: 656.62
DOI: 10.37890/jwt.vi88.730

Архитектурно-конструктивные особенности круизных судов

А.В. Посадская
ORCID 0009-0000-7592-4046
ВУНЦ «Военно-морская академия им. адм. Н.Г. Кузнецова», г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: В современности перспективное развитие получили речные и морские путешествия, осуществляемые на круизных судах. Специфика таких путешествий предопределяет наличие у круизных судов конструктивных особенностей, учет которых позволяет судно, наиболее полно отвечающее потребностям круизной туриндустрии. Общие правила конструирования круизных судов, как пассажирских, заданы Российским Морским регистром судоходства и Российским Речным Регистром, «Международной конвенции по охране человеческой жизни на море (**SOLAS - International Convention for the Safety of Life at Sea)**». Специфичные требования к конструкциям круизных судов, направленные на обеспечение комфортного отдыха туристов, формально не регламентированы классификационным обществами. В статье рассмотрены общие и специфичные конструктивные особенности отечественных круизных судов, рассмотрены их особенности на примерах российской практики, обоснована рекомендация начала проектирования круизного судна как объекта туриндустрии. Статья построена на синхронизации нормативных положений классификационных обществ, взглядов различных исследователей на проблемы круизного судоходства и судостроения.

Ключевые слова: круизное судно, конструкция, особенности, требования классификационных обществ, комфорт, водоизмещающие суда, суда на воздушной полушке, круизное судно как объект туриндустрии.

Design features of cruise ships

Anastasia V. Posadskaya
ORCID 0009-0000-7592-4046
VUNC «Naval Academy named after Admiral N.G. Kuznetsov», St. Petersburg, Russia

Abstract: River and sea voyages carried out on cruise ships have developed in modern times. The specifics of such trips limit the availability of design features for cruise ships, which can be taken into account by the vessel that best meets the needs of the cruise tourism industry. The general rules for the design of cruise ships as passenger ships are set by the Russian Maritime Register of Shipping and the Russian River Register, the International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS). The specific requirements for cruise ship designs aimed at ensuring a comfortable stay for tourists are not formally regulated by classification societies. The article examines the general and specific design features of domestic cruise ships, examines their features using examples of Russian practice, and substantiates the recommendation to start designing a cruise ship as a tourist industry facility. The article is based on the synchronization of the regulations of classification societies, the views of various researchers on the problems of cruise shipping and shipbuilding.

Keywords: cruise ship, design, features, requirements of classification societies, comfort, displacement vessels, hovercraft, cruise ship as a tourist industry object.

Введение

Актуальность. Основу круизного судоходства составляют круизные суда, осуществляющие водную перевозку обособленной группы пассажиров - туристов, как совокупности лиц, путешествующих с рекреационными, развлекательными и познавательными целями. Специфика таких путешествий предопределяет наличие у круизных судов своих, конструктивных особенностей, изучение и обобщение которых позволяет проектировать суда, наиболее полно отвечающие современным требованиям круизной туриндустрии.

Цель исследования – раскрытие конструктивных особенностей круизных судов.

Объект исследования – пассажирские суда.

Предмет исследования - круизные суда.

Задачи исследования:

– проанализировать источниковую базу по тематике публикации;

– рассмотреть общие и специфичные требования к конструкции круизных судов, привести примеры их практической реализации.

Методы исследования - прием дескриптивного описания, приемы сводки, группировки и анализа технико-экономических показателей круизных судов, различные коэффициентные зависимости, характеризующие исследуемую проблему.

Результаты исследования

По общему определению, круизное судно – это судно, предназначенное для перевозки туристов, как совокупности лиц, совершающих круизы - морские и/или речные путешествия [1, с. 17].

Международная «Конвенция по облегчению международного морского судоходства 1965 года» определяет круизное судно как, «...судно, предназначенное для международных путешествий при перевозках пассажиров – участников групповой программы, размещенных на борту с целью запланированных туристических посещений одного или больше различных портов, которые при плаваниях обычно не происходят...» [2].

Российские классификационные общества специально не выделяют такой тип как «круизное судно», определяя в качестве такового «пассажирское судно» и толкуя данную категорию практически одинаково. Так:

– по определению Российского морского регистра судоходства – «...судно, предназначенное для перевозки или перевозящее более 12 пассажиров...» [3, с. 7], и

– по определению Российского Речного Регистра – «...судно, предназначенное для перевозки более 12 пассажиров...» [4, с. 17].

Объединяя данные дефиниции, заключим: круизное судно (или КС) – это пассажирское судно, осуществляющие перевозку обособленной группы пассажиров – туристов, выполняющее международный и/или внутренний туристический рейс, по определенной, публичной (т.е. объявленной) и коллективной (т.е. для одинаковой всех пассажиров) программе с рекреационными, развлекательными или познавательными целями.

С традиционных позиций, КС, как пассажирские суда, могут быть классифицированы по совокупности признаков. В их числе:

– по физическим основам плавания, как водоизмещающие суда и суда с динамическими принципами поддержания, например, суда на воздушной подушке (СВП) или суда на подводных крыльях (СПК);

– по пространству плавания, как морские суда, речные суда или суда смешанного (река-море) плавания;

– по районам плавания: а) для морских судов - суда с неограниченным районом плавания и суда с каким-либо ограничением по району плавания – рейдового или прибрежного района плавания, с

удалением не более 50, 100 и 200 миль от порта – убежища; б) для речных судов – в зависимости от установленной разрядности внутренних водных бассейнов и их ветро-волнового режима;

– иным признакам, устанавливаемым классификационными обществами: как самоходные и несамоходные суда, по типу энергетической установки, по возможности плавания во льдах (ледовых усилений), по непотопляемости, уровню автоматизации, экологичности и пр.

На наш взгляд, интересно классификационное разделение КС на суда специальной постройки и суда, приспособленные, т.е. дооборудованные или переоборудованные, для осуществления круизов. Примерами второго подхода являются российские атомный ледокол «50 лет Победы», дооборудованный (т.е. оснащенный без изменения функционального назначения) для арктического круиза и два КС - «Профессор Хромов» и «Академик Шокальский», переоборудованные (т.е. с изменением функционального назначения) для дальневосточных круизов из научно-исследовательских судов.

Отечественными классификационным обществами установлены специальные требования к пассажирским судам, в число которых попадают и КС. К примеру:

– Российский морской регистр судоходства устанавливает: «...пассажирские суда, совершающие рейсы, которые по дальности плавания не подпадают под определение короткого международного рейса, должны иметь на каждом борту спасательные шлюпки общей вместимостью, достаточной для размещения 50% общего числа находящихся на судне людей [с установленными допущениями, А.П.]... Для каждого находящегося на судне человека должен быть предусмотрен спасательный жилет [с установленными допущениями, А.П.]...» [3].

– Российское классификационное общество (Речной Регистр) устанавливает конструктивные требования для перевозки пассажиров – инвалидов с ограниченной способностью перемещения на КС, нормируют остойчивость, непотопляемость и высоту надводного борта пассажирских судов смешанного (река-море) плавания [4; 5].

Условия эксплуатации так же накладывают ограничения на конструкции КС. Например, для круизных судов смешанного (река – море) плавания класса «Волго-Балт» установлены ограничения: габаритная длина – не более 185 м, габаритная ширина – от 16,95 м до 20,1 м, осадка – от 2,9 м до 3,8 м, надводный габарит – не более 13,2 м [6]. Европейским внутренним водным путям (ВВП), в отличие от российских ВВП, присущи меньшие габариты судового хода, что ограничивает размерения КС и стимулирует выделение б*о*льших площадей для кают туристов с целью повышения пассажировместимости и увеличения коммерческого дохода. Известны габаритные ограничения для судов в зависимости от размерности пирсов и доков, по глубинам фарватеров и в прочих случаях, определяемых объективными факторами.

Важный аспект требований к конструктивным особенностям КС – это соответствие нормам «Международной конвенции по охране человеческой жизни на море» (SOLAS - International Convention for the Safety of Life at Sea), что подтверждается «Международным сертификатом пассажирского судна (International Ship Security Certificate, ISSC)». Наличие данного сертификата позволяет участвовать КС в международных круизах, в т.ч. перевозить иностранных туристов на внутрироссийских морских и речных линиях.

Специфичными требованиями к конструкции круизного судна, как к коммерческому объекту туриндустрии, пространству проживания, рекреации и

развлечения туристов, являются требования к пассажировместимости, комфортабельности размещения туристов на борту КС.

Так, базовой единицей, формирующий доход от коммерческой эксплуатации КС является турист, как пассажир, приобретающий и совершающий круиз. В этом случае, очевидно, что пассажировместимость – это один из основных (доминирующих) фактор, предопределяющих коммерческую результативность (доходность) КС и эффективность его эксплуатации (например по критериям рентабельности).

Обеспечение большей пассажировместимости отражается на архитектурно-конструктивном типе КС, проявляемом в его «многопалубности» - наличию многоярусных и протяженных надстроек, как пространству, обеспечивающему достаточные объемы и площади для размещения и отдыха большего количества пассажиров, и количества экипажа, необходимого для обслуживания круиза. К примеру, на четырехпалубном КС пр. 301[1], общая площадь для проживания пассажиров и экипажа, и площадь помещений рекреации и развлечений составляет 3 707,9 м^2, из которых площадь кают пассажиров (334 чел.) составляет 34,9%, площадь пространства рекреации (прогулочных палуб) – 37,5%, площадь пространства развлечений (бары и рестораны, конфренц- и кинозалы, и пр.) – 9,7% и площадь кают экипажа (84 чел.) – 17,9% [7, с. 46-47].

Приведенные выше величины характерны для советского речного пассажирского судна, с присущими тому времени социально-экономическим условиями и пониманием комфортного пребывания туриста на борту судна. Для западноевропейских КС, работающих в условиях более ограниченных габаритов судового хода и в рыночных условиях, свойственны несколько иные показатели – большая площадь отводится под каюты для пассажиров, за счет сокращения пространства рекреации. Это повышает вместимость судна и, как следствие, увеличивает его провозную способность, коммерческие результативность и эффективность.

Обеспечение надлежащего уровня комфорта для туристов – это фактор, оказывающий ключевое влияние на конструктивное устройство КС. Обеспечение комфортабельности КС достигается посредством конструктивных и сервисных мер.

Так, конструктивное обеспечение комфортабельности КС формируется в процессе проектирования и строительства, и выражается в создании пространства, достаточного для проживания, рекреации и развлечений туристов, их защищенности от шума и вибрации, и других источников негативного воздействия на человека. В общем случае, данные задачи решаются посредством:

– зонирования, т.е. размещения на КС зон (пространств) проживания, рекреации и развлечений туристов, удаленных от помещений (отсеков, отделений и пр.), связанных с эксплуатацией судна и являющихся источником какого-либо негативного воздействия на человека; зонирование осуществляется вертикально – по палубам, горизонтально – с выделением разнофункциональных блоков по длине КС - в носу, в корме или посередине, с разделением на автономные зоны (кластеры) внутри однородного пространства, например, разделением рекреационным пространством зоны отдыха и зоны развлечений;

[1] Советский проект речного пассажирского судна, полным водоизмещением 3 750 т и вместимостью 334 чел., построенный в ГДР в 1975- 1983 гг. серией из 22 ед. В настоящее время все суда эксплуатируются компаниями «Водоходъ», «Донинтурфлот», «Мостурфлот», «Пассажирский порт» (торговая марка Viking River Cruises), Камское речное пароходство (аренда — «Волга Wolga» и «Спутник-Гермес») и «Созвездие».

– применением каких-либо вибро- и звукопоглощающих материалов, и иных устройств, устраняющих негативное воздействие на человека или минимизирующих таковое до допустимых норм.

Первым, исторически сложившимся сервисным приемом обеспечения комфортабельности, сформировавшимся еще на линейных пассажирских судах, является разделение помещений на классы, от первого – с наибольшим уровнем комфорта, до четвертого – с минимальным набором предоставляемых услуг. Однако круизная практика свидетельствует, что в современности обеспечить комфорт «по классам» достаточно сложно, в силу большого количества туристов на борту, ограниченности судового пространства, разного подхода к организации рекреационных и развлекательных мероприятий для разных социальных групп, длительности и разнообразию маршрута, снабжению судна, численности и профессиональному составу экипажа.

Поэтому в современности считается целесообразным проектировать КС уже изначально приспособленные для обслуживания определенной категории туристов, создавая небольшие преференции их отдельным группам по комфортабельности (размещению в каютах разного класса, сервису «в номерах» и т.п.). Это позволяет оптимизировать технико-эксплуатационные характеристики КС, соотношение цены и качества туристского продукта для определенных категорий туристов. Примером такого подхода является современное российское КС «Мустай Карим», жилые, рекреационные и развлекательные помещения которого изначально проектировались под один уровень комфортности.

Правила формирования комфорта отнесены к компетенции организаций - туроператоров, эксплуатирующих КС, которые пользуются «системой звезд», с градацией от «одной звезды» (пор. 5-6 м^2 / чел., спальное место, минимальный набор мебели и услуг, общий туалет) до «пяти звезд» (св. 18 м^2 / чел., оборудование и обслуживание класса «люкс»). Считается, что уровень комфортабельности «1-2 звезды» присущ линейным пассажирским судам, уровень комфортабельности «3-4 звезды» свойственен КС, совершающим познавательно-рекреационные туры с частыми заходами в порты и подходами к берегу для экскурсионного обслуживания, уровень комфортабельности КС «5 звезд» предназначен для рекреации и развлечения туристов, посещение береговых экскурсий для которых минимально [8-10].

Однако вне зависимости от «количества звезд» обязательными элементами комфорта кают всех классов КС являются наличие кондиционеров, холодильников, санузлов, интернет- и цифровых сетей, развлекательных (игровых, видео и пр.) и иных устройств, внутрисудовой связи и т.п.

Конструктивные и сервисные приемы обеспечения комфортабельности КС взаимосвязаны. Так, размещение зон отдыха, рекреации и развлечений в пространстве КС должно соответствовать нормам обеспечения непотопляемости судна, требованию свободного доступа к спасательным средствам, правилам противопожарной безопасности и пр. Существенная концентрация пассажиров на борту, изобилие различных энергопотребляющих систем и устройств, необходимых для обеспечения комфортных проживания, рекреации и развлечений туристов, требует существенной энергообеспеченности. Например, для речного[2] КС показатели

[2] Приведение показателей на примерах речных КС обусловлено отсутствием морских КС специальной постройки под Государственным флагом РФ.

энегоовооруженности[3] составляют величины от 0,573 до 0,728 кВт/т и энергетической эффективности[4] – от 0,24 до 0,33 кВт*час/ пасс.*км [11, с. 50].

Таким образом, спецификой проектирования круизного судна является размещение на борту максимально возможного числа пассажиров в условиях заранее заданного уровня комфорта, необходимого для проживания, рекреации и развлечений туристов. То есть, при проектировании КС во главу угла ставиться оптимизации показателей пассажировместимости и комфорта их размещения, с одной стороны, и технико-эксплуатационных показателей судна в условиях гибкой конъюнктуры туристского рынка, с другой.

Современная практика круизного судоходства осуществляется на водоизмещающих судах и судах с динамическими принципами поддержания – СВП или СПК. Каждой из указанных разновидностей присущи свои особенности, своя роль и место в осуществлении туристического процесса. Рассмотрим конструктивные особенности водоизмещающих круизных судов и КС с динамическими принципами поддержания.

Так, проект круизного судна проекта ST12078P (см. рисунок 1) разработан компанией «Си Тех» в 2011 году.

Длина габаритная – 78,0 м, ширина габаритная - 13,0 м, высота борта – 3,0 м, класс Речного Регистра «О 2,0». Туристы размещаются в одной двухместной каюте «люкс», в одной двухместной каюте для инвалидов, в 2- и 4-местных каютах с санитарными блоками в каждой. Зоны отдыха и развлечений - ресторан и бал, салон, холл-фойе, прогулочные палубы. Багажное отделение вмешает 12 т. груза, грузовая зона - 2 легковых автомобиля. Каюты экипажа и обслуживающего персонала, и хозяйственные помещения размещены ниже главной (верхней) палубы. Судно предназначено для перевозки 128 туристов, уровень комфорта – «Три звезды», продолжительность рейса – 5 дней, дальность плавания – 1 500 км, скорость наибольшая – 35 км/час. Туристское пространство круизного судна зонировано: каюты отделены от зон развлечений (ресторан и бар) прогулочными палубами и судовыми конструкциями, пути передвижения экипажа изолированы от пассажирских линий перемещения [12].

СВП «Бирюса» (см. рисунок 2) предназначено для обслуживания туристского потока по оз. Байкал, продолжительностью 5 дней.

Длина СВП – 18,5 м, ширина – 8,0 м, осадка (без хода) – 0,48 м, скорость хода на спокойной воде 50 км/час, по льду и ровному снежному покрову – 75 км/час. Вместимость – 48 чел., которые размещаются в индивидуальных креслах, в общем пассажирском салоне. Положительность плавания – несколько часов, в процессе которого туристам предлагаются напитки и легкие обеды. СВП «Бирюса» осуществляющее скоростную перевозку туристов по установленному маршруту и принципу «от базы отдыха к базе отдыха», в пространстве которых оказываются туристские услуги рекреации, развлечения и отдыха путешествующим лицам [13].

Таким образом, СВП «Бирюса» - это скоростное пассажирское транспортное средство, интегрированное в туристический процесс, но не являющееся, по-сути своей, круизным судном.

[3] Как отношение величин мощности энергетической установки (N, кВт) и полного водоизмещения (D, т) - (N / D), кВт/т.

[4] Как отношение величины мощности энергетической установки (N, кВт) и произведения показателей численности пассажиров ($n_{пас,}$ чел.) и скорости хода (v, км/час) - ($N / n_{пас,} * v$), кВт*час / пасс.* км.

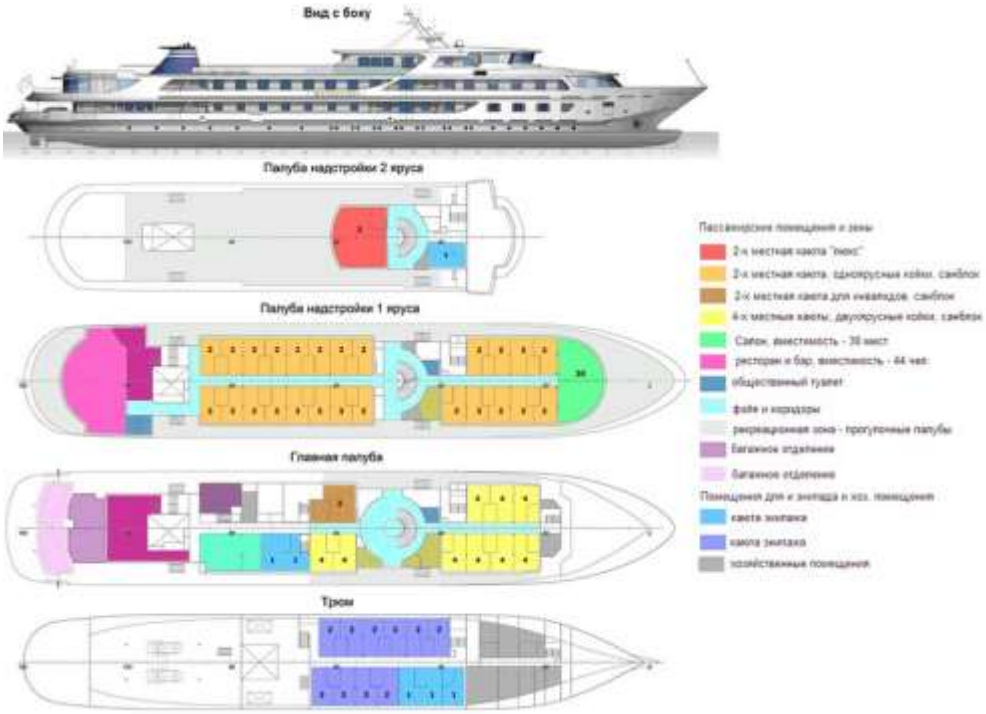


Рис. 1. Круизный теплоход проекта ST12078P



Рис. 2. Судно на воздушной подушке «Бирюса»

Специфичными достоинствами, присущими СВП являются:

– большая скорость перемещения, существенно превосходящая полный ход водоизмещающих КС,

– отсутствие существенных требований к причальному фронту и судовым подходам (фарватерам) к ним; очевидно, что для СВП достаточно пологого выхода на берег, в то время как водоизмещающим круизным судам необходимы пирсы и достаточные глубины для швартовки;

– большая продолжительность эксплуатационного периода; так водоизмещающие КС в большинстве случаев не могут работать по время ледостава, в то время как наличие ледяного покрова на водоемах не является препятствием для работы СВП.

Недостатками СВП являются:

– высокая удельная стоимость эксплуатации, например, расходы на одну тонну водоизмещения или расходы на одного перевезенного пассажира, и

– техническая невозможность создать на борту СВП полноценные условия для проживания, рекреации и развлечения туристов.

В итоге можно заключить: полный комплекс туристских услуг, а именно проживание, рекреация и развлечение туристов, могут осуществлять только водоизмещающие КС, располагающие для этого необходимыми пространствами, устройствами и системами. СВП присуща роль только скоростного пассажирского транспорта, интегрированного в какой-либо туристский процесс, проходящий на берегу.

Завершая наше исследование, рассмотрим основные типы КС, эксплуатируемые в Российской Федерации в настоящее время, см. рисунок 3.



КС «Санкт-Петербург» проекта 301



КС «Антон Чехов» проекта Q056



КС «Мустай Карим» проекта PV300

Рис. 3. Российские круизные суда

Отразим основные характеристики данных круизных судов, в таблице 1.

Таблица 1

Основные характеристики российских круизных судов

Показатель	КС «Санкт-Петербург»	КС «Антон Чехов»	КС «Мустай Карим»
Номер проекта	301	Q056	PV300
Годы строительства	1974-1983	1978-1979	2019
Количество судов в серии, ед.	22	2	2
Район плавания	речной	речной	река-море
Водоизмещение, т	3 545	2 920	4 500
Длина, м	125	115,66	141,1
Ширина, м	16.7	16,5	16,8
Осадка, м	2,7	2,8	3,0
Мощность судовой энергетической	2 206	1 800	2 400

Показатель	КС «Санкт-Петербург»	КС «Антон Чехов»	КС «Мустай Карим»
установки, кВт			
Скорость, км/час	26	25	22,5
Экипаж, чел.	78	76	79
Пассажировместимость, чел.	334	250	329
Количество палуб, ед.	4	4	4
Уровень комфорта судна	3-4 звезды	3-4 звезды	5 звезд
Энерговооруженность, кВт/т	0,622	0,616	0,533
Энергетическая эффективность, кВт*час/пасс.*км	0,334	0,288	0,324

Источники: [7; 11; 13].

Так, основу современного круизного флота России составляют пассажирские суда проектов 301 и 302 (как дальнейшее развитие проекта 301), Q040 и Q056 (как дальнейшее развитие проекта Q040), построенные еще в советский период. Данные суда прошли модернизацию в 2010-е гг., направленную, прежде всего, на повышение уровня комфортности, оцениваемой экспертами как «3-4 звезды». В отличие от этого два КС проекта PV300 изначально проектировались в концепции «плавучая гостиница, 5 звезд» и, по факту, являются единственными современными круизными судами в Российской Федерации.

Суда обладают сопоставимыми конструктивными характеристиками по критериям пассажировместимости, энерговооруженности и энергетической эффективности, с некоторым преимуществом КС пр. PV300.

Судить о коммерческой эффективности данных КС достаточно сложно, поскольку данная категория существенно зависит от таких субъективных факторов как уровень конкуренции на рынке, спрос на услуги данных КС, стоимость билетов и «коэффициент заполнения кресел»[5], стоимость судосуток эксплуатации КС и других факторов, формирующих доходность круизного судна, как объекта туристической индустрии.

Заключение

В современности, перспективный облик круизного судна является предметом исследования многих научных и экспертных сообществ. В частности, в аспектах речных круизов перспективным направлением развития считается постройка пассажирских судов смешанного (река-море) плавания, осуществляющие рейсы в период навигации по ВВП, а после ее завершения в прибрежном плавании. Унифицированные между собой проекты таких судов предложены Санкт-Петербургским «Морским инженерным бюро», а именно:

– «Волго-Балт макс» (проект PV500VB), пассажировместимостью 500 чел., для эксплуатации на линии «Москва - Санкт-Петербург - Астрахань» в навигационный период и возможностью выхода в Финский залив, а также в Балтийское и Северное моря;

– «Волго-Дон макс» (проект PV300VD) пассажировместимостью 300 чел., предназначено для эксплуатации на ВВП с выходом в прибрежные морские районы [9, с. 51].

Однако вне зависимости от свойств и качеств будущего КС, базовым аспектом проектирования является его первоначальная оценка как объекта туристической индустрии, пространства с заданным уровнем комфортабельности для обслуживания определенной категории туристов, сформированная с учетом

[5] Показатель, характеризующий заполнение мест на пассажирском воздушном судне (сленг).

рекомендаций ученых – экономистов и маркетологов (напр. см. [15]). Полагаем, что перспективное КС должно иметь рациональные технико-экономические параметры, адаптированные к внешним условиям – особенностям туристских потока и индустрии в месте эксплуатации, и небольшой срок окупаемости, что актуально для России с достаточно продолжительными периодами «туристского межсезонья». Полагаем, что изложенные выше материалы помогут успешно решить данные задачи

Список литературы

1. Павлюченко Ю.Н. История судостроения: Круизные суда: учебное пособие / Ю.Н. Павлюченко, Е.М. Новосельцев. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2009. – 198 с.
2. Convention on Facilitation of International Maritime Traffic (FAL) // International Maritime Organization [Электронный ресурс]. – URL: https://www. imo.org / (дата доступа 30.05.2026).
3. Правила классификации и постройки морских судов. Часть I. Классификация. НД № 2-020101-174. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2024. – 259 с.
4. Правила классификации и постройки судов. Правила (в 5-и томах). Т. 1. – М.: Российское Классификационное Общество, 2016. – 22 с.
5. Роннов Е. П., Давыдова С. В., Шмаков В. М. Нормирование остойчивости, непотопляемости и надводного борта пассажирских судов смешанного (река-море) плавания // Научные проблемы водного транспорта. 2024. № 8. URL: https://cyberleninka.ru/article/ n/normirovanie-ostoychivosti-nepotoplyaemosti-i-nadvodnogo-borta-passazhirskih-sudov-smeshannogo-reka-moreplavaniya (дата обращения: 30.05.2026).
6. Егоров Г.В., Анисимов К.О., Калугин Я.В. Круизные пассажирские суда река-море плавания проекта PV300VD // Maritime Market. 2016. №2 (56) URL: https://mosrp.ru/studio/wp-content/ uploads/2016/06/Статья-МБ-PV300-1.pdf (дата доступа 30.05.2026).
7. Денисова Е.И. Состояние и перспективы развития речных круизных судов // Вестник ВГАВТ. 2012. № 31. С. 44-47. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-i-perspektivy-razvitiya-rechnyh-kruiznyh-sudov (дата доступа 31.05.2026).
8. Семин А. Речной круизный флот: современность и перспективы // Infoflot.ru. – URL: https://www.newsletter. infoflot.ru /Articles/56/56.htm (дата доступа 31.05.2026).
9. Роннов Е.П., Михеев Д.А., Кочнев Ю.А. Методика оценки комфортабельности туристических речных судов / Речной транспорт, № 2 (110). – 2024. – С.26–29.
10. Михеев Д.А., Роннов Е.П., Сугаков В.Г. Особенности задачи оптимизации проектных элементов и характеристик круизного судна внутреннего плавания / Морские интеллектуальные технологии, № 3, часть 3. – 2025.– С. 161–165.
11. Любимов В.К. Особенности архитектурно-конструктивного типа современных речных круизных судов // Вестник ВГАВТ. 2018. Вып. 55. С. 49-54.
12. Круизное судно «Красноярск-2» пр. ST12078P // Си Тех. - URL: https://www.sea-tech.ru/rus/project/passengers/cruise_78/design.htm (дата доступа 31.05.2026).
13. «Бирюса» (СВП) // Теплоходы ООО «Водоход». – 2026. - URL: https://vodohod. com/ships/biryusa/ (дата доступа 04.06.2026).
14. Шестаков С.И., Быкова Е.П. Анализ состояния пассажирского внутреннего водного транспорта России // Вестник Евразийской науки. 2025. Т. 17. № s3. - URL: https://esj.today/PDF/13FAVN 325.pdf. (дата доступа 30.05.2026).
15. Логунова Н.А. Теоретико-методологические основы стратегического развития круизного туризма Дис. на соиск. ст. докт. эконом. наук, спец. 08.00.03 «Экономика и управление национальным хозяйством». – Симферополь, 2014. – 439 с.

References

1. Pavlyuchenko Yu.N. Istoriya sudostroeniya: Kruiznye suda: uchebnoe posobie / Yu.N. Pav-
1. lyuchenko, E.M. Novosel'tsev. – Vladivostok: Izd-vo DVGTU, 2009. – 198 s.
2. Convention on Facilitation of International Maritime Traffic (FAL) // International Maritime Organization [Ehlektronnyi resurs]. – URL: https://www. imo.org / (data dostupa 30.05.2026).

3. Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov. Chast' I. Klassifikatsiya. ND № 2-020101-174. – SPb.: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2024. – 259 s.
4. Pravila klassifikatsii i postroiki sudov. Pravila (v 5-i tomakh). T. 1. – M.: Rossijskoe Klassifikacionnoe Obshchestvo, 2016. – 22 s.
5. Ronnov E. P., Davydova S. V., Shmakov V. M. Normirovanie ostoichivosti, nepotoplyaemo-sti i nadvodnogo borta passazhirskikh sudov smeshannogo (reka-more) plavaniya // Nauchnye proble-my vodnogo transporta. 2024. № 8. URL: https://cyberleninka.ru/article/ n/normirovanie-ostoychivosti-nepotoplyaemosti-i-nadvodnogo-borta-passazhirskih-sudov-sme-shannogo-reka-moreplavaniya (data ob-rashcheniya: 30.05.2026).
6. Egorov G.V., Anisimov K.O., Kalugin Ya.V. Kruiznye passazhirskie suda reka-more plava-niya proekta PV300VD // Maritime Market. 2016. №2 (56) URL: https://mosrp.ru/studio/wp-content/ uploads/2016/06/Stat'ya-MB-PV300-1.pdf (data dostupa 30.05.2026).
7. Denisova E.I. Sostoyanie i perspektivy razvitiya rechnykh kruiznykh sudov // Vestnik VGAVT. 2012. № 31. S. 44-47. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-i-perspektivy-razvitiya-rechnyh-kruiznyh-sudov (data dostupa 31.05.2026).
8. Semin A. Rechnoi kruiznyi flot: sovremennost' i perspektivy // Infoflot.ru. – URL: https://www.newsletter. infoflot.ru /Articles/56/56.htm (data dostupa 31.05.2026).
9. Ronnov E.P., Miheev D.A., Kochnev Yu.A. Metodika ocenki komfortabel'nosti turisticheskih rechnyh sudov / Rechnoj transport, № 2 (110). – 2024. – S.26–29.
10. Miheev D.A., Ronnov E.P., Sugakov V.G. Osobennosti zadachi optimizacii proektnyh elementov i harakteristik kruiznogo sudna vnutrennego plavaniya / Morskie intellektual'nye tekhno-logii, № 3, chast' 3. – 2025.– S. 161–165.
11. Lyubimov V.K. Osobennosti arkhitekturno-konstruktivnogo tipa sovremennykh rechnykh kruiznykh sudov // Vestnik VGAVT. 2018. Vyp. 55. S. 49-54.
12. Kruiznoe sudno «Krasnoyarsk-2» pr. ST12078P // Si Tekh. - URL: https://www.sea-tech.ru/rus/project/passengers/cruise_78/design.htm (data dostupa 31.05.2026).
13. «Biryusa» (SVP) // Teplokhody OOO «Vodokhod». – 2026. - URL: https://vodohod. com/ships/biryusa/ (data dostupa 04.06.2026).
14. Shestakov S.I., Bykova E.P. Analiz sostoyaniya passazhirskogo vnutrennego vodnogo transporta Rossii // Vestnik Evraziiskoi nauki. 2025. T. 17. № s3. - URL: https://esj.today/PDF/13FAVN 325.pdf. (data dostupa 30.05.2026).
15. Logunova N.A. Teoretiko-metodologicheskie osnovy strategicheskogo razvitiya kruizno-go turizma Dis. na soisk. st. dokt. ehkonom. nauk, spets. 08.00.03 «Ehkonomika i upravlenie natsio-nal'nym khozyaistvom». – Simferopol', 2014. – 439 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Посадская Анастасия Валерьевна, старший преподаватель ВУНЦ «Военно-морская академия им. адм. Н.Г. Кузнецова», аспирант кафедры управления морским транспортом Морского Государственного университета им. адм. Г.И. Невельского.

Anastasia V. Posadskaya, Senior lecturer at the All-Russian Scientific and Scientific Center «Naval Academy named after Admiral N.G. Kuznetsov», postgraduate student at the Department of Marine Transport Management at the Nevelsky Maritime State University.

Статья поступила в редакцию 08.06.2026; принята к публикации 22.06.2026; опубликована онлайн 20.09.2026. Received 08.06.2026; published online 20.09.2026.

УДК 629.12
DOI: 10.37890/jwt.vi88.722

Обоснование математической модели выбора основных элементов сухогрузного судна

И.Д. Степанов
ORCID: 0009-0007-4154-8338
Е.М. Грамузов
ORCID: 0000-0003-1549-2063
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В статье представлена математическая модель проектирования сухогрузных судов, позволяющая на ранних стадиях разработки проекта определять оптимальные значения основных характеристик судна с учётом условий эксплуатации и нормативных требований Российской Федерации. Разработка модели для сухогрузных судов обусловлена необходимостью сокращения сроков проектирования судна, снижения стоимости проектных работ, объективной оценки влияния проектных параметров на эксплуатационные качества судна, а также автоматизации поиска решений в условиях множества ограничений. В работе детально рассмотрены допущения при построении модели, включая идеализированные условия движения и особенности расчёта ходкости. Особое внимание уделено ограничениям, характерным для эксплуатации сухогрузных судов в Российской Федерации: габаритам гидротехнических сооружений (шлюзов, мостов), глубинам фарватеров, требованиям классификационных обществ, сезонным и гидрологическим условиям. Представлены аналитические зависимости, используемые в процессе проектирования, с расшифровкой содержащихся в них величин. В их число входят: уравнение плавучести, уравнение масс (с детализацией по составляющим водоизмещения), уравнение ходкости (определение сопротивления и потребной мощности), уравнение остойчивости и уравнение вместимости. Разработанная модель выступает эффективным инструментом для обоснованного выбора проектных решений, обеспечивая баланс технических, экономических и эксплуатационных требований при проектировании сухогрузных судов.

Ключевые слова: Сухогрузное судно, математическая модель, уравнения плавучести, уравнение масс, уравнение ходкости, уравнение остойчивости, уравнение вместимости

Justification of the mathematical model for selecting the main elements of a dry cargo vessel

Igor D. Stepanov
ORCID: 0009-0007-4154-8338
Evgeny M. Gramuzov
ORCID: 0000-0003-1549-2063
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. This article presents a mathematical model for the design of dry cargo vessels. This model allows early determination of optimal values of key vessel characteristics, taking into account operating conditions and regulatory requirements of the Russian Federation. The development of this model for dry cargo vessels is driven by the need to reduce design time, to lower design costs, to objectively assess the impact of design parameters on vessel performance, and to automate the search for solutions under multiple constraints. The paper examines in detail the assumptions used in constructing the model, including idealized traffic conditions and performance calculation features. Particular attention is paid to constraints specific to the operation of dry cargo vessels in the Russian Federation: the dimensions of

hydraulic structures (locks, bridges), channel depths, classification society requirements, and seasonal and hydrological conditions. The analytical relationships used in the design process are presented, along with the explanation of the values they contain. These include buoyancy equation, mass equation (with details on displacement components), propulsion equation (determination of resistance and required power), stability equation, and capacity equation. The developed model serves as an effective tool for design decisions, ensuring the balance of technical, economic, and operational requirements in the design of dry cargo vessels.

Keywords: dry cargo ship, mathematical model, buoyancy equations, mass equation, speed equation, stability equation, capacity equation

Введение

Разработка сухогрузных судов представляет собой сложную многопараметрическую задачу, в рамках которой необходимо согласованно учитывать целый ряд аспектов — технических, эксплуатационных и экономических. Классические подходы к проектированию, базирующиеся на затратных модельных экспериментах в опытовых бассейнах, всё чаще вытесняются аналитическими методами оптимизации, опирающимися на возможности математического моделирования.

Математическое моделирование при проектировании сухогрузных судов становится особенно востребованным благодаря трём обстоятельствам: необходимости уменьшать длительность и себестоимость проектирования; важности получения объективных оценок влияния варьируемых параметров на эксплуатационные качества судна; а также возможности автоматически находить наилучшие проектные решения при наличии целого спектра ограничений.

1. Структура математической модели проектирования

Под математической моделью принято понимать такую совокупность соотношений (включающую уравнения, неравенства и функциональные зависимости), которая позволяет вычислить величину критерия оптимизации при любом заданном наборе оптимизируемых параметров.

Разработка сухогрузных судов сопряжена с рядом специфических особенностей, которые отличают этот процесс от создания прочих гражданских водоизмещающих судов. До недавнего времени формирование обводов для сухогрузов осуществлялось главным образом посредством дорогостоящих экспериментов на моделях, проводимых в опытовых бассейнах [1]. Вместе с тем, последние результаты, полученные в сфере изучения ходкости, создали предпосылки для внедрения аналитических оптимизационных процедур в процесс разработки обводов судов данного типа. Принимая во внимание тесную корреляцию формы корпуса с основными конструктивными характеристиками, была разработана математическая модель, ориентированная на проектирование сухогрузного судна [2, 8].

Математическая модель включает:

1). Совокупность исходных данных, регламентированных техническим заданием на разработку проекта сухогрузного судна (полезная грузоподъёмность, скорость хода, класс судна, район плавания, автономность, численность экипажа и прочие), согласно [7]:

$$\bar{C}(c_1, c_2, \dots, c_n)\bar{C}(c_1, c_2, \dots, c_n) \qquad (1.1)$$

2). Совокупность искомых характеристик, выступающих в роли оптимизируемых параметров проекта (главные размерения, коэффициенты полноты, параметры

компоновки, водоизмещение, мощность энергетической установки, а также форма корпуса сухогрузного судна, описываемая соответствующими коэффициентами формы):

$$\overline{\mathrm{X}}(\mathrm{x}_1, \mathrm{x}_2, \dots, \mathrm{x}_\mathrm{n})\overline{\mathrm{X}}(\mathrm{x}_1, \mathrm{x}_2, \dots, \mathrm{x}_\mathrm{n}) \quad (1.2)$$

3). Система ограничений, в состав которой входят аналитические зависимости, применяемые при проектировании сухогрузного судна (уравнение масс, уравнение плавучести, уравнение остойчивости, уравнение вместимости, уравнение ходкости):

$$\mathrm{G_j}(\overline{\mathrm{X}}, \overline{\mathrm{C}}) \geq \mathrm{A_j} \quad \mathrm{j} = 1, \dots, \mathrm{m} \quad (1.3)$$

Функция G_j представляет собой оценки j-х качеств судна, а функции $\mathrm{A_j}$ - требования к этим качествам.

4) Ограничения, накладываемые на элементы вектора искомых характеристик (осадка, ширина корпуса, высота надводного борта и прочие):

$$x_i^{min} \leq x_i \leq x_i^{max} \quad (1.4)$$

При корректно сформулированном техническом задании может существовать несколько векторов x, отвечающих условиям (1.3) и (1.4). Данное обстоятельство указывает на наличие ряда проектных альтернатив, удовлетворяющих установленным требованиям. С целью идентификации оптимального варианта в рассмотрение вводится целевая функция.

5) Целевую функцию:

$$ExtrZ(\overline{\mathrm{X}}, \overline{\mathrm{C}}) \quad (1.5)$$

2. Исходные данные и допущения при построении математической модели

Построение любой математической модели проектирования базируется на двух основополагающих источниках: техническом задании, предъявляемом заказчиком, и совокупности аналитических уравнений, формализующих процесс проектирования. При разработке подобной модели приходится прибегать к определённым упрощениям и вводить ряд ограничений, которые, тем не менее, не вносят принципиальных искажений в поведение реального физического объекта. В окончательную математическую модель судна включаются исключительно те уравнения и неравенства, которые описывают свойства, оказывающие определяющее влияние на реализацию судном своего функционального назначения и в то же время воздействующие на искомые оптимизируемые параметры.

Применительно к сухогрузным судам в фундамент модели было положено допущение о перемещении судна в идеализированной среде, для которой разработаны апробированные методики определения ходкости. Собственно модель опирается на конкретные расчётные процедуры, дающие возможность установить, каким образом варьирование изменяемых параметров отражается на ходкости сухогруза.

В ряду эксплуатационных качеств сухогрузного судна значимую позицию занимает маневренность, охватывающая три компонента: устойчивость на курсе, поворотливость и инерционные свойства. Данные практических наблюдений свидетельствуют, что все современные сухогрузы обладают эксплуатационной устойчивостью на курсе. Поворотливость же приобретает особую значимость при эксплуатации судна в стеснённых акваториях. В пределах отношений длины к ширине, типичных для речных и морских сухогрузов, поворотливость обусловливается преимущественно маневренными характеристиками пропульсивной установки, а также свойствами движительно-рулевого комплекса. Инерционные

качества, со своей стороны, определяются в первую очередь маневренностью энергетической установки. Отсюда следует, что маневренные характеристики сухогруза демонстрируют слабую корреляцию с оптимизируемыми параметрами и не должны оказывать воздействия на их выбор.

Вместимость сухогрузного судна выступает в качестве определяющего фактора при назначении проектных характеристик. Именно рыночные требования — род перевозимого груза и соображения экономической эффективности — диктуют оптимальное соотношение главных размерений, мощности судовой энергетической установки, скорости хода и стоимости судна. На стадии выбора проектных параметров, кроме того, требуется проведение расчётов начальной остойчивости, осадки и дифферента. От результатов этих расчётов зависят мореходные качества судна, его способность к оптимальной загрузке и, как следствие, экономическая эффективность.

В качестве движителей на сухогрузах применяются четырёхлопастные гребные винты фиксированного шага, работающие в направляющих насадках.

Применение килеватости днища для рассматриваемого типа судов признаётся нецелесообразным. Обоснование сводится к следующему: при равных значениях водоизмещения, длины и ширины корпуса судно, обладающее килеватостью днища, неизбежно характеризуется увеличенной осадкой в сопоставлении с судном, не имеющим киля. Наконец, в процессе проектирования сухогрузов, предназначаемых для эксплуатации в речных и морских акваториях Российской Федерации, в обязательном порядке надлежит принимать во внимание район предстоящего плавания.

Проектирование сухогрузов, предназначенных для работы на водных путях России (реки, моря, смешанные маршруты «река-море»), сопряжено с необходимостью учёта комплекса жёстких ограничений — от инфраструктурных параметров водных путей до требований классификационных обществ и природоохранного законодательства. Рассмотрим ключевые группы ограничений, определяющих допустимые значения главных размерений, грузоподъёмности, мореходных и эксплуатационных качеств судна.

Прежде всего, габариты судна жёстко лимитируются размерами гидротехнических сооружений и особенностями фарватеров. Длина сухогруза должна соответствовать длине шлюзовых камер, доков и причалов, а также обеспечивать возможность маневрирования на извилистых участках.

При проектировании судов в основу ложатся шлюзы Волго-Донского канала, которые имеют длину 145 м [3], что фактически задаёт верхний предел для судов, планирующих прохождение по этому маршруту.

Ширина судна не может превышать ширину шлюзов (для Волго-Донского канала — 17,88 м), пролётов мостов и минимальных радиусов поворота в фарватере.

Высота надводного габарита ограничивается высотой мостовых переходов и иных надводных сооружений: так, на участке реки Дон (2588,6–2875,5 км) максимально допустимая высота составляет 14 м, а на реке Москва (191,5–200,0 км) — 10,4 м [9].

Осадка судна является одним из наиболее критичных параметров, поскольку напрямую зависит от глубин на маршруте. На речных участках осадки часто вводятся временные ограничения, особенно в периоды меженного стока. Например, на Волге (участок Городец — Нижний Новгород) в периоды обмеления администрация бассейна публикует ежедневные радиобюллетени с допустимыми значениями осадки. В морских портах осадка ограничена глубинами у причалов и в акватории; для судов с большой осадкой может потребоваться ледокольное или буксирное сопровождение. Во всех случаях необходимо обеспечивать минимальные запасы под днищем (обычно 0,3–0,5 м) с учётом типа грунта и местных регламентов.

Грузоподъёмность и вместимость сухогруза также подчиняются строгим ограничениям. Так, Волго-Донской канал рассчитан на суда грузоподъёмностью до 7 000 тонн. На речных маршрутах максимальная загрузка определяется сочетанием осадки, габаритов шлюзов и прочности причальных сооружений. Вместимость трюмов должна быть согласована с типом перевозимого груза (навалочные, генеральные грузы) и требованиями к остойчивости.

Скорость движения и манёвренные характеристики также подвержены регламентации [4]. На речных участках установлены дифференцированные ограничения: для судов грузоподъёмностью свыше 3 000 т — не более 7 км/ч; для судов 2 000–3 000 т — не более 8 км/ч; для судов менее 2 000 т — не более 11 км/ч. В зонах причалов, портов, пляжей и населённых пунктов скорость обычно ограничивается 12–15 км/ч. Манёвренные параметры (диаметр циркуляции, время торможения) должны гарантировать безопасное движение в узких фарватерах и при шлюзовании.

Таким образом, проектирование сухогруза для эксплуатации в РФ требует комплексного учёта: инфраструктурных лимитов (габариты шлюзов, мостов, глубины); нормативных требований (правила РРР, РМРС, КТМ, технические регламенты); сезонных и гидрологических условий (обмеление, ледовая обстановка); эксплуатационных ограничений (скорость, манёвренность, грузоподъёмность).

3. Аналитические уравнения проектирования

В основу математической модели были положены перечисленные ниже уравнения проектирования: уравнение плавучести, уравнение масс, уравнение ходкости, уравнение остойчивости, уравнение вместимости [5].

1. Уравнения плавучести не отличается от общепринятой формы записи:

$$D = k_{\text{в}}\rho\delta LBT, \tag{3.1}$$

где $k_{\text{в}}$ − коэффициент выступающих частей ($k_{\text{в}} \leq 1{,}03$); ρ − плотности морской воды ρ=1,025; δ − коэффициент общей полноты судна; L − расчетная длина проектируемого
судна, м; B − расчетная ширина проектируемого судна, м; T − расчетная осадка проектируемого судна, м.

2. Уравнение масс.

Водоизмещение судна, D, т, включает в себя водоизмещение порожнего судна $D_{\text{пор}}$, т, и дедвейт DW, т [6].

$$D = D_{\text{пор}} + DW, \tag{3.2}$$

Водоизмещение судна порожнем подразделяется на разделы масс и представляется в следующей форме:

$$D_{\text{пор}} = P_k + P_y + P_{cc} + P_M + P_{\text{эл}} + P_{\text{в}} + P_{\text{з}} + P_{\text{пос.груз}} + P_{\text{сн}} + P_{\text{зв}}, \tag{3.3}$$

где P_k − масса корпуса; P_y − масса судовых устройств; P_{cc} − масса судовых систем; P_M − масса энергетической установки; $P_{\text{эл}}$ − масса электроэнергетической системы, внутрисудовой связи и управления; $P_{\text{в}}$ − масса вооружения; $P_{\text{з}}$− масса запасных частей; $P_{\text{пос.груз}}$ − масса постоянных жидких грузов; $P_{\text{сн}}$ − масса снабжения, имущества; $P_{\text{зв}}$ − запас водоизмещения.

Разделы масс $P_k,\ P_y,\ P_{cc},\ P_{\text{эл}},\ P_{\text{в}},\ P_{\text{з}},\ P_{\text{пос.груз}},\ P_{\text{сн}}$ можно определить по формуле:

$$P_i = p_i LBH, \tag{3.4}$$

где P_i − измеритель масс соответствующего раздела, определенный по судну-прототипу.

Масса энергетической установки P_M и запас водоизмещения $P_{зв}$ можно определить по следующим формулам:

$$P_M = p_M N_e, \tag{3.5}$$

$$P_{зв} = p_{зв} D_{пор}, \tag{3.6}$$

Таким образом, получим:

$$D_{пор} = \left(P_k + P_y + P_{cc} + P_{эл} + P_в + P_з + P_{пос.груз} + P_{сн}\right)LBH + p_M N_e + p_{зв} D_{пор}, \tag{3.7}$$

или:

$$D_{пор} = p_{ко} LBH + p_M N_e + p_{зв} D_{пор}, \tag{3.8}$$

$$D_{пор} = \frac{p_{ко} LBH + p_M N_e}{1 - p_{зв}}, \tag{3.9}$$

Дедвейт DW сухогрузного судна включает следующие разделы:

$$DW = P_{эк} + P_т + P_{жг}, \tag{3.10}$$

где $P_{эк}$ – масса экипажа, провизии, воды, расходных материалов; $P_т$ – запас топлива, масла, воды; $P_{жг}$ – масса переменных жидких грузов.

Масса экипажа, провизии, воды, расходных материалов $P_{эк}$:

$$P_{эк} = P_э + P_{пр} + P_в + P_{отбр}, \tag{3.11}$$

где $P_э$ – масса экипажа, т; $P_{пр}$ – масса провизии, т; $P_в$ – масса воды для экипажа, т; $P_{отбр}$ – масса пищевых и твердых отбросов, т.

Масса экипажа находится по формуле:

$$P_э = m_э n_э, \tag{3.12}$$

где $m_э = 0{,}12$ – масса одного человека с багажом, т; $n_э$ – численность экипажа проектируемого судна, чел.

Масса провизии:

$$P_{пр} = p_{пр} n_э A, \tag{3.13}$$

где $p_{пр} = 4 * 10^{-3}$ – суточная норма провизии на одного человека, $\frac{т}{чел*сут}$; А – автономность судна, сут.

Масса воды для экипажа:

$$P_в = p_в n_э A, \tag{3.14}$$

где $p_в = 0{,}1$ – норма воды на одного человека в сутки, $\frac{т}{чел*сут}$.

Масса пищевых и твердых отбросов:

$$P_{отбр} = p_{отбр} n_э A, \tag{3.15}$$

Где $p_{отбр} = 1{,}2 * 10^{-3}$ – норма отбросов одного человека в сутки, $\frac{т}{чел*сут}$;

Таким образом, получим:

$$P_{\text{эк}} = m_{\text{э}}n_{\text{э}} + p_{\text{пр}}n_{\text{э}}\text{A} + p_{\text{в}}n_{\text{э}}\text{A} + p_{\text{отбр}}n_{\text{э}}\text{A} \quad (3.16)$$

или:

$$P_{\text{эк}} = n_{\text{э}}\text{A}\left(\frac{m_{\text{э}}}{\text{A}} + p_{\text{пр}} + P_{\text{в}} + P_{\text{отбр}}\right) \quad (3.17)$$

Запас топлива, масла, воды $P_{\text{т}}$:

$$P_{\text{т}} = p_{\text{т}}k_1k_2Nt, \quad (3.18)$$

Где $p_{\text{т}}$ – удельный расход топлива, $\frac{\text{т}}{\text{кВт}*\text{ч}}$; $k_1 = 1{,}15$ – коэффициент морского запаса;

$k_2 = 1{,}15$ – коэффициент, учитывающий увеличение расхода топлива на работы вспомогательных механизмов, на запасы смазки и питательной воды, на стояночные режимы; t= 24А – автономность судна, ч.

Масса переменных жидких грузов:

$$P_{\text{жг}} = P_{\text{зг}} + P_{\text{зп}}, \quad (3.19)$$

где $P_{\text{зг}}$ – масса запасных грузов для передачи аварийным судам, т; $P_{\text{зп}}$ – масса загрязненных и подсланевых вод, т.

$$P_{\text{зп}} = p_{\text{зп}}n_{\text{э}}\text{A}, \quad (3.20)$$

где $p_{\text{зп}} = 0{,}15$ – масса загрязненных и подсланевых вод одного человека в сутки, $\frac{\text{т}}{\text{чел}*\text{сут}}$.

Таким образом, получим:

$$DW = n_{\text{э}}\text{A}\left(\frac{m_{\text{э}}}{\text{A}} + p_{\text{пр}} + P_{\text{в}} + P_{\text{отбр}}\right) + p_{\text{т}}k_1k_2Nt24A + P_{\text{зг}} + p_{\text{зп}}n_{\text{э}}\text{A}.$$

3. Уравнение ходкости.

Приближённое определение полного сопротивления движению судна может быть выполнено согласно выражению [2]:

$$R = R_{\text{тр}} + R_{\text{ост}}, \quad (3.21)$$

где $R_{\text{тр}}$ – сопротивление трения; $R_{\text{ост}}$– остаточное сопротивление.

Сопротивление трения можно определить с помощью следующего выражения [2]:

$$R_{\text{тр}} = (\xi_{mn} + \xi_{\text{ш}} + \xi_{\text{вч}})\frac{\rho v^2}{2}\Omega, \quad (3.22)$$

где ξ_{mn} – коэффициент трения эквивалентной гладкой пластины; $\xi_{\text{ш}}$ – надбавка на шероховатость; $\xi_{\text{вч}}$– надбавка выступающие части; Ω – смоченная поверхность корпуса судна; v – скорость судна, м/с.

Коэффициент трения эквивалентной гладкой пластины можно определить по формуле [2]:

$$\xi_{mn} = \frac{0{,}455}{(lgRe)(lgRe)^{2{,}58}}, \quad (3.23)$$

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{vL}{v}, \tag{3.24}$$

где v – скорость судна, м/с; L – длина судна, м; $\nu = 1{,}15 * 10^{-6}\ \frac{м^2}{с}$ – коэффициент кинематической вязкости воды.

Смоченная поверхность корпуса судов с большими значениями коэффициента общей полноты δ можно определить по приближенной формуле В.А. Семеки [5]:

$$\Omega_0 = LT\{2 + 1{,}37(\delta - 0{,}274)\,{}^{B}/_{T}\}, \tag{3.25}$$

Остаточное сопротивление определяется по формуле:

$$R_{ост} = \zeta_{ост}\frac{\rho v^2}{2}\Omega, \tag{3.26}$$

где $\zeta_{ост}$– коэффициент остаточного сопротивления, для форм корпусов с коэффициентами полноты $\delta \geq 0{,}800$ определяется по формуле [2]:

$$\zeta_{ост} = \frac{2{,}15\delta^3 Fr^{\frac{2}{3}}}{\left(\frac{L}{B}\right)^2 * \left(\frac{B}{T}\right)^{0{,}5}} \tag{3.27}$$

Число Фруда:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}}, \tag{3.28}$$

где v – скорость судна, м/с; L – длина судна, м; g – свободное ускорение, $\frac{м^2}{с}$.

Буксировочная мощность определяется по формуле:

$$N_R = Rv, \tag{3.29}$$

Мощность главной ЭУ судна определяется по формуле:

$$N_e = \frac{N_R}{\eta_S \eta_D}, \tag{3.30}$$

где η_S – КПД передачи мощности, принятый равен 0,97; η_D– пропульсивный коэффициент, принятый равен 0,7.

4. Уравнение остойчивости.

На начальных стадиях проектирования, когда главные элементы судна уже установлены, однако теоретический чертёж пока не разработан, уравнение остойчивости представляется в виде, традиционно используемом в теории проектирования судов [2]:

$$h = \frac{\alpha^2}{11{,}4\delta}\frac{B^2}{T} + 0{,}5\left(\frac{\alpha}{\delta}\right)^{0{,}5} T - z_g, \tag{3.31}$$

где, h – абсолютная метацентрическая высота судна, м; B, T – главные размерения судна, м; α – коэффициент полноты площади ГВЛ; δ – коэффициент общей полноты судна; z_g – аппликата центра тяжести судна.

5. Уравнение вместимости.

Уравнение вместимости может быть представлено следующим образом:

$$W_{\text{ф}} = \sum W_i, \tag{3.32}$$

где $\sum W_i$ – сумма потребных теоретических объемов, м^3; $W_{\text{ф}}$– фактическая вместимость корпуса и надстроек, м^3.

В.Л. Поздюниным была введена обобщенная запись левой части уравнения вместимости [2]:

$$W_{\text{ф}} = W_{\text{к}}(1 + s_{\text{н}}), \tag{3.33}$$

где $s_{\text{н}}$ − коэффициент развития надстроек (отношение объемов надстроек (рубок) и корпуса); $W_{\text{к}}$ – объем корпуса, м^3.

Объем корпуса определяется по формуле [2]:

$$W_{\text{к}} = k_c \frac{D}{\rho}\left(\frac{H}{T}\right)^{\frac{\alpha}{\delta}}, \tag{3.34}$$

где k_c– коэффициент седловатости; ρ − плотность воды.

Формула для определения фактической вместимости судна имеет вид:

$$W_{\text{ф}} = k_c(1 + s_{\text{н}})\frac{D}{\rho}\left(\frac{H}{T}\right)^{\frac{\alpha}{\delta}}. \tag{3.35}$$

Заключение

В ходе исследования разработана математическая модель проектирования сухогрузных судов, позволяющая на ранних стадиях проекта определять оптимальные значения основных характеристик судна с учётом заданных условий эксплуатации и нормативных требований. Основные элементы судна определяются путём совместного решения уравнений математической модели. Таким образом, предложенная математическая модель представляет собой эффективный инструмент для решения задач проектирования сухогрузных судов, обеспечивающий обоснованный выбор проектных характеристик на ранних стадиях разработки.

Список литературы

1. Овчинников К.Д., Белая А.Б. Оценка ходовых качеств водоизмещающих транспортных судов на начальных стадиях проектирования: учебное пособие, г. Санкт-Петербург. СПбГМТУ. 2024, 192 с.
2. Гайкович, А. И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов. Том 2. Анализ и синтез системы «Корабль». – СПб.: Издательство НИЦ МОРИНТЕХ, 2014. – 872 с.
3. Волго-Донской канал (Волго-Дон) – URL: https://www.locman.net/volgodon.htm.
4. Приказ Министерства транспорта РФ от 24 июля 2018 г. N 270 «Об утверждении Правил движения и стоянки судов в Волго-Донском бассейне внутренних водных путей Российской Федерации».
5. Зуев В.А., Калинина Н.В., Рабазов Ю.И. Выбор основных характеристик морских транспортных судов на начальной стадии проектирования: учеб. пособие / В.А. Зуев, Н.В. Калинина, Ю.И. Рабазов; Нижегород. гос. техн. ун-т. Нижний Новгород, 2012. - 225 с.
6. Грамузов Е. М. Определение основных характеристик спасательного судна методом совместного решения уравнений теории проектирования / Е. М. Грамузов, В. К. Май //

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. - 2013. - №3(22). - С. 25-33. DOI: 10.21821/2309-5180-2013-5-3-25-33.
7. Грамузов Е. М. Обоснование проектных характеристик речных ледоколов / Е. М. Грамузов, Н. Е. Тихонова // Тр. НГТУ. — Н. Новгород, 2013. — № 3.
8. Калинина Н.В. Теоретико-экспериментальный подход к прогнозированию ледовой ходкости при движении судов набегами // Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 4 часть 2, С. 15—24.
9. ФБУ «Администрация «Волго-Дон»– URL: https://vdgbu.ru.

References

1. Ovchinnikov K.D., Belaya A.B. Assessment of the Performance of Displacement Transport Vessels at the Initial Stages of Design: Textbook, St. Petersburg. SPbGMTU. 2024, 192 p.
2. Gaikovich, A. I. Theory of Design of Displacement Ships and Vessels. Volume 2. Analysis and Synthesis of the Ship System. – St. Petersburg: Publishing House of NITs MORTINTECH, 2014. – 872 p.
3. Volga-Don Canal (Volgo-Don) – URL: https://www.locman.net/volgodon.htm.
4. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated July 24, 2018, No. 270 «On Approval of the Rules for the Movement and Parking of Vessels in the Volga-Don Basin of the Inland Waterways of the Russian Federation».
5. Zuev V.A., Kalinina N.V., Rabazov Yu.I. Selection of the main characteristics of sea transport vessels at the initial design stage: textbook / V.A. Zuev, N.V. Kalinina, Yu.I. Rabazov; Nizhny Novgorod. state tech. university. Nizhny Novgorod, 2012. - 225 p.
6. Gramuzov E. M. Determination of the main characteristics of a rescue vessel by the method of joint solution of design theory equations / E. M. Gramuzov, V. K. May // Bulletin of the Admiral S. O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. - 2013. - No. 3 (22). - P. 25-33. DOI: 10.21821/2309-5180-2013-5-3-25-33.
7. Gramuzov E. M. Justification of the design characteristics of river icebreakers / E. M. Gramuzov, N. E. Tikhonova // Proceedings of NSTU. - N. Novgorod, 2013. - No. 3.
8. Kalinina N.V. Theoretical and experimental approach to forecasting ice performance during ship movements in increments // Marine intellectual technologies. 2025. No. 4 part 2, pp. 15-24.
9. Federal State Budgetary Institution «Volga-Don Administration» - URL: https://vdgbu.ru.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Степанов Игорь Дмитриевич, аспирант, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (ФГБОУ ВО НГТУ им. Р.Е. Алексеева), 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, email: igor.d.stepanov@mail.ru

Igor D. Stepanov, postgraduate student, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (NSTU n.a. R.E. Alekseev), Minina, 24, Nizhny Novgorod, 603155

Грамузов Евгений Михайлович, д.т.н., профессор кафедры кораблестроение и авиационная техника, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (ФГБОУ ВО НГТУ им. Р.Е. Алексеева), 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, email: terkor54@mail.ru

Evgeny M. Gramuzov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department «Shipbuilding and Aviation Technology», Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (NSTU n.a. R.E. Alekseev), Minina, 24, Nizhny Novgorod, 603155

Статья поступила в редакцию 06.04.2026; принята к публикации 22.06.2026; опубликована онлайн 20.09.2026. Received 06.04.2026; published online 20.09.2026.

УДК 629.5.015:620.193
DOI: 10.37890/jwt.vi88.744

Анализ основных механизмов деградации корпуса судна: синергетика, моделирование и методы контроля

А.А. Трочук
ORCID 0009-0006-2039-1717
А.Р. Рубан
Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия

Аннотация. Постепенные отказы корпусов судов связаны с развитием процессов коррозии, износа и усталости материала, вероятность возникновения которых возрастает по мере увеличения срока эксплуатации судна [15]. Это подтверждает необходимость комплексного рассмотрения указанных процессов при оценке технического состояния корпуса. Их совместное воздействие приводит к снижению несущей способности и затрудняет оценку остаточной долговечности конструкций. В работе выполнен анализ взаимного влияния этих факторов с использованием классических моделей прогнозирования долговечности — закона Пэриса, правила Майнера, вероятностного подхода на основе модели пропорциональных рисков Кокса — а также современных методов обработки данных на основе машинного обучения. По данным экспериментальных исследований совместное действие коррозии и циклических нагрузок приводит к существенному сокращению долговечности по сравнению с изолированным воздействием каждого фактора. Предложена концептуальная структура интегрированной системы мониторинга технического состояния корпуса, объединяющая различные типы датчиков (волоконно-оптические, электрохимические, акустической эмиссии) и методы интеллектуальной обработки сигналов (автоэнкодеры для очистки от шумов). Результаты могут быть использованы при разработке систем мониторинга технического состояния судов, совершенствовании подходов к техническому обслуживанию по фактическому состоянию, а также при подготовке нормативных документов классификационными обществами.

Ключевые слова: корпус судна, деградация, коррозия, усталость, трещины, совместное влияние процессов, остаточный ресурс, цифровой двойник, предиктивное обслуживание

Analysis of the main mechanisms of ship hull degradation: synergistics, modeling, and monitoring methods

Anton A. Trochuk
ORCID 0009-0006-2039-1717
Anatoly R. Ruban
Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

Abstract. Corrosion wastage, fatigue damage and crack formation are the main mechanisms of degradation of ship hull structures. Their combined action leads to an accelerated reduction in load-bearing capacity and complicates the prediction of residual life. Objective - to analyse the mutual influence of these factors and to assess the capabilities of modern methods for monitoring and predicting the technical condition of a ship's hull. To achieve this goal, classical durability assessment models are considered, including Paris law and Miner's rule, probabilistic approaches based on the Cox proportional hazards model, as well as modern data processing methods based on machine learning algorithms. Results. It is shown that the combined action of corrosion and cyclic loading leads to a significant reduction in durability compared to the isolated effect of each factor. It has been established

that local forms of corrosion act as stress concentrators and contribute to accelerated fatigue damage development. A conceptual structure of an integrated system for monitoring the technical condition of the hull is proposed, combining various types of sensors and intelligent data processing methods. Practical significance. The results can be used in the development of ship technical condition monitoring systems and in improving approaches to condition-based maintenance, as well as in the preparation of regulatory documents by classification societies.

Keywords: ship hull, degradation, corrosion, fatigue, cracks, synergistic effect, residual life, digital twin, Condition Based Maintenance.

Введение

Корпус судна является основным несущим элементом, определяющим безопасность эксплуатации, надежность и срок службы судна. В процессе эксплуатации корпусные конструкции подвергаются воздействию морской среды, переменных механических нагрузок и циклических напряжений, что приводит к развитию коррозионного износа, накоплению усталостных повреждений и образованию трещин. Указанные процессы постепенно изменяют техническое состояние корпуса, снижают его несущую способность и требуют своевременного выявления при проведении освидетельствований и ремонтов.

Согласно исследованиям отечественных авторов, постепенные отказы корпусных конструкций в значительной степени обусловлены развитием процессов коррозии, износа и усталости материала, вероятность возникновения которых возрастает по мере увеличения продолжительности эксплуатации судна [15]. Поэтому обеспечение надежности корпусных конструкций остается одной из важнейших задач судостроения и эксплуатации флота.

В отечественной практике оценка технического состояния корпусов судов выполняется в соответствии с требованиями Правил Российского морского регистра судоходства (РМРС) и основана на результатах периодических освидетельствований, измерений остаточных толщин, выявлении повреждений и анализе их развития. Существенный вклад в развитие методов оценки технического состояния корпусных конструкций, прогнозирования остаточного ресурса и совершенствования методов технической эксплуатации внесли отечественные исследователи [3, 5, 15].

В мировой практике накоплен значительный опыт математического моделирования отдельных процессов, влияющих на техническое состояние корпуса судна. Разработаны модели прогнозирования коррозионного износа, накопления усталостных повреждений и распространения трещин, основанные на работах Pike, Miner, Paris и других исследователей. Эти модели широко применяются при оценке остаточного ресурса судовых конструкций и разработке современных систем мониторинга технического состояния. Вместе с тем большинство зарубежных моделей разрабатывалось с учетом конструктивных особенностей судов, используемых материалов и условий эксплуатации, характерных для зарубежного флота. Эти условия во многих случаях отличаются от практики эксплуатации отечественных судов, значительная часть которых имеет продолжительный срок службы и эксплуатируется в иных климатических и технологических условиях. В связи с этим применение зарубежных моделей при оценке технического состояния судовых конструкций требует их адаптации с учетом требований отечественной нормативной базы и особенностей эксплуатации российского флота.

Несмотря на значительное число исследований, посвященных оценке технического состояния корпуса судна, коррозионный износ, усталостные повреждения и развитие трещин чаще всего рассматриваются как самостоятельные процессы. Однако в процессе эксплуатации они оказывают взаимное влияние друг на

друга. Так, уменьшение толщины элементов вследствие коррозии приводит к перераспределению напряжений, что способствует более интенсивному накоплению усталостных повреждений и повышает вероятность образования и дальнейшего развития трещин. Поэтому раздельное применение существующих методов не всегда позволяет получить объективную оценку технического состояния корпуса и достаточно надежно прогнозировать его остаточный ресурс.

В связи с этим актуальной является разработка комплексного подхода, объединяющего результаты оценки коррозионного износа, напряженно-деформированного состояния, усталостных повреждений и трещинообразования в единую последовательность анализа технического состояния корпуса судна.

Целью настоящей работы является анализ основных процессов износа и повреждений корпуса судна, исследование их взаимного влияния, обзор применяемых методов моделирования и контроля, а также разработка последовательности комплексной оценки технического состояния корпусных конструкций, объединяющей существующие инженерные методы в единую методику.

1. Коррозия как фундаментальный процесс деградации

Коррозия является наиболее распространённым и во многих случаях определяющим фактором старения корпусных конструкций [3]. Морская вода представляет собой сложный электролит с высокой ионной проводимостью, содержащий хлориды, сульфаты, карбонаты, растворённый кислород и биогенные компоненты, что создаёт идеальные условия для протекания электрохимических процессов [3].

В зависимости от условий эксплуатации, конструктивных особенностей и наличия защитных покрытий выделяют несколько основных видов коррозии. В процессе эксплуатации судов наиболее распространённым видом повреждений является равномерный коррозионный износ, при котором толщина металла постепенно уменьшается по всей поверхности элемента. Он развивается преимущественно на участках с нарушенным защитным покрытием, в балластных танках и на днищевой обшивке [3]. Не меньшую опасность представляет язвенная коррозия, при которой разрушение металла носит локальный характер. Образующиеся язвы становятся концентраторами напряжений и ускоряют развитие усталостных повреждений. Наиболее часто такие дефекты выявляются в районе ватерлинии, скуловых поясах и на отдельных участках днища [3].

Коррозионное растрескивание под напряжением возникает при одновременном воздействии агрессивной среды и растягивающих напряжений. Наиболее подвержены ему высокопрочные стали и сварные соединения, содержащие остаточные сварочные напряжения [3]. Гальваническая (контактная) коррозия обусловлена образованием гальванических пар между разнородными металлами (например, стальной корпус и бронзовый гребной винт, алюминиевые надстройки и стальной корпус) при наличии электролита. Щелевая коррозия развивается в зазорах, под накладками, в соединениях внахлест, где затруднён доступ кислорода и происходит локальное изменение химического состава раствора.

Электрохимическая коррозия стали в морской воде описывается анодной реакцией растворения железа ($Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$) и катодной реакцией восстановления кислорода ($O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$).

Суммарный процесс приводит к образованию продуктов коррозии (ржавчины), которые в зависимости от условий могут быть рыхлыми или плотными и существенно влиять на дальнейшую скорость разрушения [3].

Для описания коррозионного износа судовых конструкций в зарубежной практике часто используют модель Пайка [2], которая в общем виде представляет собой степенную зависимость:

$$d(t) = c1 \cdot (t - Tcl)^{c2} \quad (1)$$

где d(t) – глубина коррозии (мм);
t – время эксплуатации (годы);
T_cl – срок службы защитного покрытия (годы), в течение которого коррозия практически отсутствует; c_1 и c_2 – эмпирические коэффициенты, определяемые по статистическим данным для конкретного типа конструкции и условий эксплуатации [2].

В частном случае, когда показатель степени $c_2 = 1$, модель Пайка сводится к линейной зависимости, широко используемой в инженерной практике [3]:

$$\delta(t) = \delta_0 - k_\{corr\} \cdot t \quad (2)$$

где δ_0 – начальная толщина (мм);
k_corr – средняя скорость коррозии (мм/год).

Следует отметить, что модель Пайка [2] разработана для металлоконструкций с защитными покрытиями, включая оцинкованные. Для судов отечественного флота, эксплуатирующихся в течение длительного времени при частичной или полной утрате защитных покрытий, применение данной модели без корректировки может приводить к существенным погрешностям оценки коррозионного износа. Поэтому при расчётах технического состояния судовых конструкций необходимо учитывать фактические условия эксплуатации, результаты измерения остаточных толщин и данные периодических освидетельствований в соответствии с требованиями действующих нормативных документов и рекомендациями отечественных исследований.

В работах последних лет всё большее распространение получают гибридные модели, в которых базовый физический тренд комбинируется с поправками, прогнозируемыми методами машинного обучения [9]. Входными параметрами здесь выступают температура забортной воды, солёность (проводимость), скорость судна (влияющая на турбулентность и массоперенос), эффективность катодной защиты (ток, потенциал), географический регион плавания (тропики, умеренные широты, арктические воды), а также время года, определяющее сезонную активацию биопомех. Такой подход позволяет сохранить физическую интерпретируемость и одновременно достичь высокой точности прогноза.

2. Усталостные повреждения: от микропластичности до макроразрушения

Усталость металла — это накопление повреждений при циклическом изменении напряжений. В корпусных конструкциях основным источником циклических нагрузок является волновое воздействие, которое создаёт знакопеременные напряжения в элементах набора и обшивке [3].

Процесс усталостного разрушения традиционно подразделяют на три стадии [3, 8]. Первая стадия — накопление рассеянных микроповреждений, когда на микроуровне происходит локальная пластическая деформация в зонах структурной неоднородности (включения, границы зёрен), образование полос скольжения и зарождение микропор. Вторая стадия — зарождение макроскопической трещины, когда объединение микроповреждений приводит к образованию трещины; момент зарождения трудно фиксируется традиционными методами неразрушающего контроля. Третья стадия — распространение трещины, представляющее собой стабильный и ускоренный рост дефекта под действием циклических нагрузок,

описываемый законами линейной механики разрушения; эта стадия завершается критическим ростом и разрушением конструкции.

Наиболее распространённым способом оценки накопления усталостных повреждений остаётся линейное правило Майнера [4], согласно которому суммарное повреждение определяется как отношение фактически реализованных циклов нагружения к числу циклов, вызывающих разрушение при соответствующем уровне напряжений:

$$D = \sum_i \frac{ni}{Ni} \tag{3}$$

где n_i – число циклов нагружения заданной амплитуды $\Delta\sigma_i$ (или σ_{ai});

N_i – долговечность материала при этой амплитуде, определяемая по кривым усталости (S-N кривой);

D – накопленное повреждение, причём разрушение предполагается при D = 1 [3, 4].

Широкое применение правила Майнера объясняется простотой расчётов и наличием экспериментальных данных по усталостной долговечности различных сталей и сварных соединений. Вместе с тем данный подход основан на линейном суммировании повреждений и поэтому не учитывает влияние последовательности нагружения, изменения характера циклов, воздействия коррозионной среды и особенностей развития трещин [3, 8].

Для описания более сложных режимов нагружения используются нелинейные модели, включая правило Кортен-Долана [5]:

$$D = \sum \frac{ni}{Ni} \cdot \left(\frac{\Delta\sigma i}{\Delta\sigma max}\right)^d \tag{4}$$

а также методы, учитывающие историю изменения напряжений и последовательность циклов [8].

В условиях эксплуатации судна напряжения изменяются неравномерно под действием волнения, вибрации корпуса, работы движительной установки и других эксплуатационных факторов. Поэтому перед расчётом накопленного повреждения экспериментальные данные проходят предварительную обработку: выполняются фильтрация сигналов, выделение циклов нагружения (например, методом «дождя» — rainflow) и их последующая классификация по уровню напряжений.

В последние годы всё более активно исследуются методы машинного обучения для прогнозирования усталостного состояния конструкций. В частности, сети долгой краткосрочной памяти (LSTM) способны анализировать временные последовательности напряжений и учитывать зависимость текущего состояния конструкции от предшествующей истории нагружения, что расширяет возможности прогнозирования остаточного ресурса по сравнению с традиционными линейными моделями [2, 9].

3. Трещинообразование: механика разрушения и методы обнаружения

Трещины — наиболее опасный вид дефектов: они могут развиваться быстро, часто без видимых признаков, и приводить к внезапному разрушению [2, 3]. Для описания напряжённо-деформированного состояния в окрестности трещины в рамках линейно-упругой механики разрушения используется коэффициент интенсивности напряжений K. В зависимости от типа нагружения различают K_I при нормальном отрыве (растяжении), K_{II} при поперечном сдвиге и K_{III} при антиплоском сдвиге. Критическое значение K_{Ic}, называемое вязкостью разрушения, характеризует сопротивление материала распространению трещины [8].

Рост трещины под действием циклических нагрузок описывается уравнением Пэриса (Paris).

Согласно современному учебнику по механике разрушения [6], это уравнение имеет вид:

$$da/dN = C \cdot (\Delta K)\hat{}m \quad (5)$$

где a – длина трещины;

N – число циклов нагружения;

ΔK – размах коэффициента интенсивности напряжений;

C и m – эмпирические константы, зависящие от материала и среды [6, 8].

В коррозионной среде наблюдается снижение порогового значения ΔK_{th}, при котором трещина начинает расти, и увеличение константы C, что приводит к ускоренному росту и проявлению коррозионно-усталостного разрушения [3].

Для обнаружения трещин в судовых конструкциях применяется комплекс методов неразрушающего контроля. Визуальный и измерительный контроль остаётся наиболее доступным, но позволяет выявить только макроскопические трещины, уже вышедшие на поверхность. Ультразвуковой контроль чувствителен к внутренним дефектам, однако требует непосредственного доступа к поверхности и высокой квалификации оператора. Магнитопорошковый и капиллярный методы эффективны для выявления поверхностных трещин в ферромагнитных и неферромагнитных материалах соответственно [3]. Наиболее перспективным методом для раннего обнаружения зарождающихся трещин является акустическая эмиссия (АЭ), принцип которой основан на регистрации упругих волн, генерируемых при пластической деформации, раскрытии трещины и трении её берегов.

Применение метода акустической эмиссии на судах осложняется высоким уровнем шумов, возникающих под воздействием гидродинамических процессов, работы судовых механизмов и волнения. Для повышения достоверности обнаружения дефектов всё чаще используются методы интеллектуальной обработки сигналов, в том числе автоэнкодеры — нейронные сети, обучаемые на данных, соответствующих исправному состоянию конструкции [9].

В процессе обучения автоэнкодер формирует модель нормального сигнала и в дальнейшем оценивает степень отклонения поступающих данных от этого состояния. Появление аномальных сигналов, связанных с развитием трещин или других дефектов, сопровождается увеличением ошибки восстановления, что позволяет использовать её в качестве диагностического признака. Такой подход не требует предварительной разметки данных и обеспечивает эффективное обнаружение дефектов даже в условиях значительного уровня шумов [9].

4. Совместное влияние процессов износа корпуса судна

Особенностью процессов износа корпуса судна является их взаимное влияние [3]. На практике коррозионный износ, усталостные повреждения и развитие трещин протекают одновременно, поэтому их раздельный анализ не всегда позволяет объективно оценить техническое состояние конструкции и остаточный ресурс. Развитие одного вида повреждений может изменять условия возникновения и интенсивность других процессов, что необходимо учитывать при комплексной оценке состояния корпуса судна [1, 9].

Коррозия влияет на усталостное разрушение по нескольким механизмам [3, 8]. Во-первых, геометрический фактор: уменьшение толщины листа и образование язв приводит к увеличению номинальных напряжений и созданию локальных концентраторов. Во-вторых, коррозионная среда снижает предел выносливости стали

по сравнению с воздушной средой, что проявляется в явлении коррозионной усталости. В-третьих, происходит изменение механизмов разрушения: в коррозионной среде усталостное разрушение наступает при меньших амплитудах напряжений, а область малоцикловой усталости расширяется [9]. По данным экспериментальных исследований совместное действие коррозии и циклических нагрузок приводит к существенному сокращению долговечности по сравнению с изолированным воздействием каждого фактора.

В свою очередь, циклическое нагружение способствует развитию коррозии [3]. Оно приводит к разрушению защитных покрытий и оксидных плёнок в зонах пластической деформации, обнажению свежих поверхностей металла, более активных в электрохимическом отношении, созданию условий для застойных зон электролита в микротрещинах и углублениях, а также снижению эффективности катодной защиты из-за циклического изменения поляризации. В результате усталостно-коррозионное воздействие формирует более глубокую и разветвлённую локальную коррозию, чем в отсутствие циклических нагрузок [3].

Коррозионная среда оказывает значительное влияние и на кинетику роста трещин [2, 3]. Под её действием снижается пороговое значение ΔK_{th}, при котором трещина начинает расти, увеличивается константа C в уравнении Пэриса, наблюдается эффект коррозионно-усталостного разрушения, особенно выраженный при низких частотах нагружения (характерных для волновых нагрузок), а также возможно развитие статического коррозионного растрескивания при наличии постоянных растягивающих напряжений [3]. В зонах сварных соединений, где имеются остаточные напряжения и структурная неоднородность, скорость роста трещин может быть на порядок выше, чем в основном металле [3].

Для концептуального описания совместного влияния процессов может использоваться представление, в которой общее повреждение D_total представляется как сумма или комбинация повреждений от отдельных факторов с учётом перекрёстных членов:

$$D_{total} = D_{corr} + D_{fat} + D_{crack} + I_{corr-fat} + I_{fat-corr} + I_{corr-crack} \quad (6)$$

где I_{ij} – интегральные члены, описывающие усиление одного процесса другим.

Такое представление позволяет учесть синергетические эффекты, которые в линейных подходах остаются за рамками анализа.

Для комплексной оценки технического состояния могут применяться вероятностные модели, в частности модель пропорциональных рисков Кокса [7], позволяющая оценить вероятность отказа с учетом совокупности факторов:

$$h(t) = h_0(t) \cdot exp(\beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \ldots + \beta_n x_n) \quad (7)$$

где $h_0(t)$ – базовый риск отказа;

x_i – параметры, характеризующие техническое состояние конструкции и условия эксплуатации;

β_i – коэффициенты модели, определяемые по статистическим данным.

Преимущество данного подхода заключается в возможности одновременно учитывать влияние нескольких факторов, включая коррозионный износ, накопленные усталостные повреждения и наличие трещин. Это позволяет использовать модель для оценки риска отказа и прогнозирования остаточного ресурса судовых конструкций, что представляет интерес для систем обслуживания по техническому состоянию [1, 10].

Методика комплексной оценки технического состояния корпуса судна с учётом совместного влияния процессов износа

В практике технической эксплуатации судов состояние корпусных конструкций обычно оценивают по отдельным видам повреждений [10, 14, 15]. Коррозионный износ определяют по результатам измерения остаточных толщин, усталостное состояние — расчётными методами или по данным эксплуатации, а наличие трещин устанавливают средствами неразрушающего контроля. При этом в отечественных исследованиях особое внимание уделяется выбору контролируемых элементов корпуса, определению объёма измерений и организации дефектационных работ [14].

Несмотря на широкое применение этих методов, чаще всего они используются независимо друг от друга. Между тем в процессе эксплуатации коррозионный износ, усталостные повреждения и развитие трещин взаимосвязаны. Уменьшение толщины элементов приводит к росту рабочих напряжений, повышение напряжений ускоряет накопление усталостных повреждений, а локальные очаги коррозии становятся концентраторами напряжений и способствуют зарождению трещин.

После появления трещины напряжённое состояние конструкции изменяется вновь, что ускоряет её дальнейшее развитие. Одновременно агрессивная среда, проникая в полость трещины, способствует локальному коррозионному износу. Таким образом, изменение технического состояния корпуса представляет собой последовательность взаимосвязанных процессов, каждый из которых влияет на последующие стадии повреждения конструкции.

С учётом этой взаимосвязи оценку технического состояния целесообразно выполнять последовательно, используя результаты каждого этапа как исходные данные для следующего. Такой подход не изменяет существующие расчётные модели, а объединяет их в единую схему анализа технического состояния корпуса судна.

Предлагаемая методика включает пять взаимосвязанных этапов.

На первом этапе анализируется коррозионный износ корпусных конструкций. Основанием служат результаты очередного освидетельствования судна и измерений остаточных толщин. По полученным данным оценивается фактическое состояние элементов корпуса, выявляются зоны общего и локального износа, а также определяется состояние защитных покрытий и соответствие конструкций требованиям Правил Российского морского регистра судоходства (РМРС) [10]. При необходимости дальнейшее изменение толщины элементов может быть спрогнозировано с использованием модели, рассмотренной в разделе 1.

Далее полученные значения остаточных толщин используются при расчёте напряжённого состояния конструкции. Уменьшение площади поперечного сечения приводит к увеличению рабочих напряжений, поэтому фактическое состояние корпуса должно учитываться при последующей оценке его долговечности. Расчёты выполняются по действующим нормативным документам и общепринятым методикам расчёта прочности судовых конструкций.

Следующий этап связан с оценкой накопленного усталостного повреждения. Для расчёта используются результаты определения напряжённого состояния и сведения об условиях эксплуатации судна. В качестве базового подхода применяется правило линейного суммирования повреждений Майнера [4] (формула 3), а при наличии информации об изменении нагрузок могут использоваться нелинейные модели накопления повреждений [5]. Это позволяет определить степень использования усталостного ресурса рассматриваемых элементов корпуса.

После оценки усталостного состояния выполняется анализ выявленных трещин. Для этого используются результаты визуального и инструментального неразрушающего контроля, по которым определяются размеры, расположение и

характер дефектов. Их дальнейшее развитие оценивается методами механики разрушения, включая закон Пэриса [6] (формула 5), что позволяет прогнозировать скорость роста трещин и вероятность достижения ими предельных размеров в течение заданного периода эксплуатации.

На заключительном этапе результаты предыдущих расчётов рассматриваются совместно. Остаточная толщина элементов используется при определении напряжённого состояния, рассчитанные напряжения служат исходными данными для оценки усталостного повреждения, а результаты усталостного анализа и неразрушающего контроля учитываются при прогнозировании развития трещин. Последовательная передача результатов между этапами обеспечивает комплексную оценку технического состояния корпуса без изменения физических предпосылок применяемых расчётных моделей.

На основе совокупности полученных результатов принимается решение о возможности дальнейшей эксплуатации конструкции, необходимости ремонта, усиления или корректировки межремонтного периода с учётом требований нормативных документов, результатов технического освидетельствования и расчётной оценки остаточного ресурса.

Предлагаемая методика не заменяет существующие методы оценки коррозионного износа, расчёта прочности или механики разрушения. Её основная задача состоит в последовательном объединении этих подходов в рамках единой схемы оценки технического состояния корпуса судна. При этом результаты каждого этапа используются на последующих этапах расчёта, что позволяет учитывать взаимное влияние процессов износа без изменения применяемых расчётных моделей.

Практическая реализация методики возможна в составе современных систем технического наблюдения за корпусом судна [9]. В этом случае результаты периодических освидетельствований, измерений остаточных толщин [12], данные о режимах эксплуатации [13], материалы неразрушающего контроля и расчётные модели рассматриваются как единая информационная база. Их совместный анализ позволяет более обоснованно оценивать техническое состояние корпусных конструкций, прогнозировать остаточный ресурс и принимать решения о ремонте или дальнейшей эксплуатации судна [10].

На рисунке 1 показана схема комплексной оценки технического состояния корпуса судна. В её основе лежит последовательное использование результатов каждого этапа расчёта при выполнении последующих. Это позволяет учитывать взаимное влияние коррозионного износа, усталостных повреждений и развития трещин при прогнозировании остаточного ресурса корпусных конструкций.

5. Методы мониторинга и переход к предиктивному обслуживанию

Сегодня на флоте техническое обслуживание построено либо по расписанию — когда судно ставят в док строго по графику, — либо по факту: случилась поломка — устранили [1]. Ни тот, ни другой подход не учитывают, как на самом деле изнашивается корпус. А значит, нельзя понять, сколько он ещё прослужит, что создаёт предпосылки для необоснованных затрат, так и для рисков аварийности.

Чтобы постоянно следить за состоянием корпуса в эксплуатации, используют целый набор инструментов [9]. Это и тензометрия — датчики, которые замеряют деформации и напряжения в самых ответственных местах: на днище, скуле, палубе, сварных швах. Всё чаще вместо обычных датчиков ставят волоконно-оптические — они не боятся ни коррозии, ни помех. Плюс электрохимические датчики, которые прямо на ходу показывают, с какой скоростью идёт коррозия. Ещё — системы акустической эмиссии: они слушают, не появилась ли где-то микротрещина, и сами определяют, откуда идёт сигнал. Отдельно — контроль катодной защиты по току и потенциалу, чтобы понимать, работает ли она как надо. И наконец — дроны и

подводные роботы (ROV), которые залезают в самые труднодоступные места и всё осматривают.

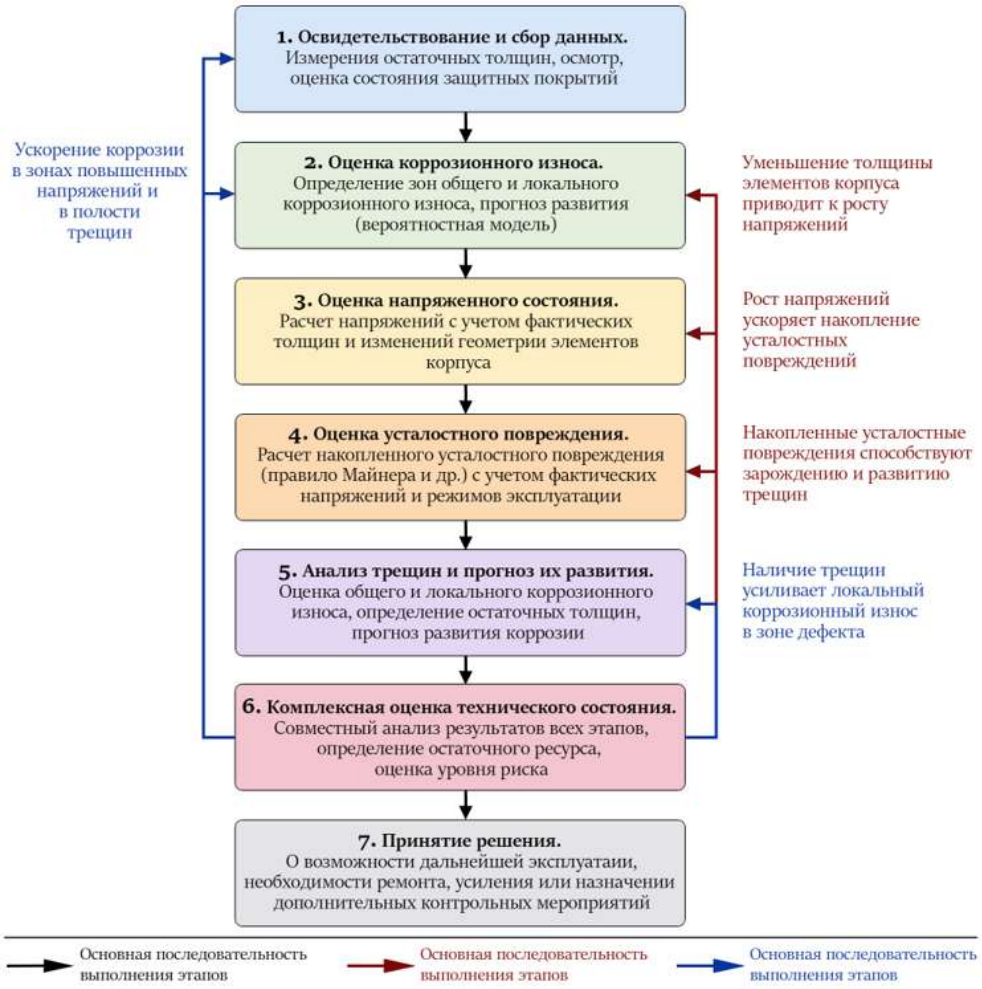


Рис. 1. Алгоритм комплексной оценки технического состояния корпуса судна с учётом совместного влияния процессов износа

Переход на обслуживание по фактическому состоянию — это не просто смена графика. Это целая система: непрерывный сбор данных с датчиков, их обработка, анализ с помощью гибридных моделей искусственного интеллекта, которые совмещают классическую физику и машинное обучение [2, 9]. На основе этих расчётов оценивается риск отказа — с учётом коррозии, усталости, трещин. И выдаются рекомендации по ремонту: экономически обоснованные, привязанные к реальному состоянию судна [1]. Главный результат — вместо плановых докований по графику ремонты проводят тогда, когда они действительно нужны [9].

Переход на обслуживание по фактическому состоянию даёт реальные плоды — эксплуатационные расходы снижаются, внеплановых ремонтов становится меньше, а техника оказывается в большей готовности [9]. Но цифры, конечно, зависят от

конкретного судна, от того, какие датчики и системы на нём стоят, и в каких условиях оно работает.

Всё это работает на единой платформе — цифровой модели корпуса, которая постоянно обновляется и живёт в режиме реального времени [9]. Она объединяет геометрию, прочность, технологию, данные с датчиков, расчёты напряжённо-деформированного состояния с учётом актуальных нагрузок и модели износа, которые учитывают совместное влияние разных процессов. На основе такого объединения обеспечивается прогнозирование остаточной долговечности и визуализация состояния. Создание цифровой модели требует решения комплекса задач: разработки методов калибровки моделей по данным мониторинга, создания высокопроизводительных вычислительных модулей для расчётов в реальном времени, обеспечения кибербезопасности и защиты данных, а также стандартизации форматов обмена информацией между судном и береговыми центрами.

6. Требования Российского морского регистра судоходства (РМРС) к оценке дефектов

В Российской Федерации надзор за техническим состоянием судов осуществляет Российский морской регистр судоходства (РМРС). В соответствии со Стандартными правилами классификации и постройки морских судов РМРС (2026) расчёт степени коррозионного износа и усталостных трещин проводится по результатам периодических проверок по методике «максимальный износ» (сравнение реальной толщины с предельно допустимой) [10]. Действующие Правила РМРС ориентированы преимущественно на оценку фактического технического состояния конструкций по результатам освидетельствований, дефектации и измерения остаточных толщин элементов корпуса.

Некоторые классификационные общества в своих руководствах заявляют о поддержке систем мониторинга на основе обслуживания по фактическому состоянию. Однако детальных алгоритмов, как объединять и интерпретировать данные по коррозии, усталости и трещинам, они не дают. На практике это выливается в проблему: существующие стандарты писаны под традиционные подходы и плохо стыкуются с новыми технологиями. Переход на СВМ тормозится именно из-за этой неопределённости.

Заключение

Проведённый анализ показал, что коррозионный износ, усталостные повреждения и развитие трещин представляют собой взаимосвязанные процессы, совместно определяющие изменение технического состояния корпусных конструкций в процессе эксплуатации. Их раздельная оценка не всегда позволяет в полной мере учитывать взаимное влияние повреждений при прогнозировании остаточного ресурса и выборе эксплуатационных решений.

В работе рассмотрены основные механизмы износа корпусных конструкций и выполнен анализ методов оценки коррозионного состояния, накопления усталостных повреждений и развития трещин. Предложена последовательность комплексной оценки технического состояния, основанная на использовании результатов каждого этапа расчёта в качестве исходных данных для последующего анализа. Такой подход объединяет существующие инженерные методы в единую схему без изменения физических предпосылок применяемых расчётных моделей.

Практическая ценность предложенной методики заключается в возможности её применения при технических освидетельствованиях судов, оценке остаточного ресурса и планировании ремонтных мероприятий. Комплексный анализ состояния корпусных конструкций позволяет более обоснованно оценивать степень их износа и

принимать решения о дальнейшей эксплуатации, ремонте или усилении отдельных элементов.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на проверку предложенной методики по данным эксплуатации судов различных типов, уточнение закономерностей совместного развития коррозионного износа и усталостных повреждений, а также разработку рекомендаций по её практическому применению в системах технического наблюдения и при выполнении требований классификационных обществ.

Список литературы

1. Guedes Soares C., Garbatov Y. Reliability of maintained ship hulls subjected to corrosion and fatigue // Structural Safety. – 1999. – Vol. 21, No. 2. – P. 107–123.
2. Paik J.K. Ultimate Limit State Analysis and Design of Plated Structures. – 2nd ed. – Chichester : John Wiley & Sons, 2018. – 664 p.
3. Melchers R.E. Probabilistic Models for Corrosion in Structural Reliability Assessment // Corrosion Science. – 2005. – Vol. 47, No. 10. – P. 2391–2410.
4. Dowling N.E. Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue. – 4th ed. Pearson, 2013. – 960 p.
5. Fatemi A., Yang L. Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials // International Journal of Fatigue. – 1998. – Vol. 20, No. 1. – P. 9–34.
6. Anderson T.L. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications. – 4th ed. – Boca Raton : CRC Press, 2017. – 753 p.
7. Cox D.R. Regression Models and Life-Tables // Journal of the Royal Statistical Society. Series B. – 1972. – Vol. 34, No. 2. – P. 187–220.
8. Cui W. A State-of-the-Art Review on Fatigue Life Prediction Methods for Metal Structures // Journal of Marine Science and Technology. – 2002. – Vol. 7, No. 1. – P. 43–56.
9. Zio E. Prognostics and Health Management of Industrial Assets: A Review // Reliability Engineering & System Safety. – 2022. – Vol. 221. – Article 108321.
10. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. Часть II. Корпус. – Санкт-Петербург : РМРС, 2026.
11. Барышников С.О., Погодаев Л.И., Чистов В.Б. Надежность механизмов и корпусов судов: монография. – СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2018. – 251 с.
12. Барышников С.О., Красюк А.Б., Чистов В.Б. Способ расчета надежности корпусов судов и их элементов с учетом выполненных ремонтов и условий дальнейшей эксплуатации // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2020. – Т. 12. – № 1. – С. 85–95.
13. Ганнесен В.В., Петрова Е.Е. К вопросу деградации корпуса судна в результате коррозии // Научные труды Дальрыбвтуза. – 2023. – Т. 66. – № 4. – С. 144–152.
14. Бимберекov П.А. Определение потребного числа измерений остаточных толщин на участке элемента связи корпуса судна на основе оценочных зависимостей для запаса толщин и рекомендуемых скоростей изнашивания // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2015. № 1. С. 76–80.
15. Казанцев Д.А., Бурмистров Е.Г., Зинченко Д.Ф. Подготовка данных для выявления причин отказов корпусов судов и судовых технических средств // Научные проблемы водного транспорта / Russian Journal of Water Transport. – 2024. – № 80 (3). – С. 15–23.

References

1. Guedes Soares C., Garbatov Y. Reliability of maintained ship hulls subjected to corrosion and fatigue // Structural Safety. – 1999. – Vol. 21, No. 2. – P. 107–123.
2. Paik J.K. Ultimate Limit State Analysis and Design of Plated Structures. – 2nd ed. – Chichester : John Wiley & Sons, 2018. – 664 p.
3. Melchers R.E. Probabilistic Models for Corrosion in Structural Reliability Assessment // Corrosion Science. – 2005. – Vol. 47, No. 10. – P. 2391–2410.

4. Dowling N.E. Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue. – 4th ed. – Boston : Pearson, 2013. – 960 p.
5. Fatemi A., Yang L. Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials // International Journal of Fatigue. – 1998. – Vol. 20, No. 1. – P. 9–34.
6. Anderson T.L. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications. – 4th ed. – Boca Raton : CRC Press, 2017. – 753 p.
7. Cox D.R. Regression Models and Life-Tables // Journal of the Royal Statistical Society. Series B. – 1972. – Vol. 34, No. 2. – P. 187–220.
8. Cui W. A State-of-the-Art Review on Fatigue Life Prediction Methods for Metal Structures // Journal of Marine Science and Technology. – 2002. – Vol. 7, No. 1. – P. 43–56.
9. Zio E. Prognostics and Health Management of Industrial Assets: A Review // Reliability Engineering & System Safety. – 2022. – Vol. 221. – Article 108321.
10. Russian Maritime Register of Shipping. Rules for Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part II. Hull. – St. Petersburg: RMRS, 2026.
11. Baryshnikov S.O., Pogodaev L.I., Chistov V.B. Reliability of Mechanisms and Ship Hulls: monograph. – St. Petersburg: Publishing House of the State University of Maritime and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov, 2018. – 251 p.
12. Baryshnikov S.O., Krasiuk A.B., Chistov V.B. A method for calculating the reliability of vessels hulls and their elements, taking into account the performed repairs and conditions for further operation. – 2020. – Vol. 12. – No. 1. – P. 85–95.
13. Gannesen V.V., Petrova E.E. On the issue of degradation of the ship hull as a result of corrosion // Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University. – 2023. – Vol. 66. – No. 4. – P. 144–152.
14. Bimberekov P.A. Determination of the required number of measurements of residual thicknesses on the section of the ship hull structural element based on estimation dependencies for thickness allowance and recommended wear rates // Scientific Problems of Transport in Siberia and the Far East. – 2015. – No. 1. – P. 76–80.
15. Kazantsev D.A., Burmistrov E.G., Zinchenko D.F. Preparation of data to identify the causes of failures of ship hulls and ship technical equipment // Scientific Problems of Water Transport / Russian Journal of Water Transport. – 2024. – No. 80 (3). – P. 15–23.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Трочук Антон Алексеевич, аспирант кафедры судостроение и энергетические комплексы морской техники, Астраханский государственный технический университет (ФГБОУ ВО «АГТУ»), 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: trochuk19@gmail.com.

Anton A. Trochuk , Postgraduate Student of the Department of Shipbuilding and Energy Complexes of Marine Engineering, Astrakhan State Technical University (FSBEI HE «ASTU»), 16 Tatishcheva St., Astrakhan, 414056, e-mail: trochuk19@gmail.com.

Рубан Анатолий Рашидович, к.т.н., доцент, директор института морских технологий, энергетики и транспорта, Астраханский государственный технический университет (ФГБОУ ВО «АГТУ»), 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: a.ruban1974@mail.ru.

Anatoly R. Ruban , Ph.D. (Engineering), Assistant Professor, Director of the Institute of Marine Technology, Energy and Transport, Astrakhan State Technical University (FSBEI HE «ASTU»), 16 Tatishcheva St., Astrakhan, 414056, e-mail: a.ruban1974@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 21.05.2026; принята к публикации 22.06.2026; опубликована онлайн 20.09.2026. Received 21.05.2026; published online 20.09.2026.

СУДОВОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

SHIP POWER EQUIPMENT

УДК 621.4+620.93
DOI: 10.37890/jwt.vi88.723

Повышение эффективности судовых газотурбинных установок устранением влияния перекосов осей соединительных валов

С.В. Терлыч[1,2]
ORCID: 0000-0002-6044-3087
[1]Херсонская государственная морская академия, г. Херсон, Россия;
[2]Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, г. Новороссийск, Россия

Аннотация. В статье поставлена задача обосновать повышение параметров энергоэффективности судовых газотурбинных установок путем устранения негативного влияния перекосов осей соединительных валов за счет применения зубчатых муфт с комбинированной продольной модификацией зубьев. Установлено, что перекосы осей соединительных валов судовых агрегатов приводят к потере эффективной мощности при ее передаче от главного двигателя к судовому валопроводу и, как следствие, негативно влияют на показатели энергоэффективности судовых энергетических установок в частности, а также эксплуатационные характеристики и технико-экономические показатели суда в целом. Для улучшения взаимодействия элементов механических установок рекомендовано применить зубчатые муфты повышенной эксплуатационной эффективности с продольной модификацией, которые обеспечивают нормы центровки, что обеспечивает повышение эффективного коэффициента полезного действия энергетической установки и экономию удельного расхода топлива. Выявлено свойство зубчатых муфт, работающих при перекосах осей соединяемых валов машинных агрегатов, которое заключается в том, что с учетом заданных величин углов перекоса осей, размеров зубчатых муфт, параметров зацепления зубьев, а также параметров продольной модификации наружных зубьев возможно определить соответствующие величины продольной модификации внутренних зубьев, при которых усилие между всеми сопряженными парами, в условиях перекоса осей, будут распределяться практически равномерно, что обеспечит передачу эффективной мощности от главного двигателя потребителю с минимальными потерями.

Ключевые слова: энергоэффективность, перекосы осей, зубчатые муфты, судовые агрегаты

Improving the efficiency of marine gas turbine systems by eliminating the effects of misalignment in drive shafts

Stanislav V. Terlych
ORCID: 0000-0002-6044-3087
[1]Kherson State Maritime Academy, Kherson, Russia;
[2]Admiral F.F. Ushakov State Maritime University

Abstract. The article is aimed at demonstrating the improvement of energy efficiency standards for offshore gas turbine installations by eliminating the negative effects of misalignment of the axes of the connecting shafts through the use of gear couplings with a combined longitudinal adjustment of the teeth. It has been proven that misalignments of the axles of the connecting shafts of ship units lead to a loss of effective power when transferred from the main engine to the ship's shaft line and, as a result, negatively affect the energy efficiency of shipboard power plants in particular, as well as the operational characteristics and technical and economic indicators of the ship as a whole. To improve the interaction of the elements of mechanical installations, it is recommended to use gear couplings with increased operational efficiency with longitudinal adjustment, which ensures alignment parameters, which increases the effective efficiency of the power plant and provides a specific fuel consumption. To improve the interaction of elements of mechanical structures, it is recommended to use connectors with increased operational efficiency with longitudinal adjustment, which ensures equalization parameters, which increases the effective efficiency of the power plant and provides a certain fuel consumption.

Keywords: energy efficiency, axis misalignment, gear couplings, and marine units

Введение

Перекосы (расцентровка) представляют собой нарушение соосности валов, т. е. отклонение от номинального расположения осей в любом направлении. Указанные отклонения называются смещениями и подразделяются на продольные, радиальные, угловые (изломы) и комбинированные. Смещения и изломы пересчитываются в углы перекоса осей, не превышающих, согласно ГОСТ 3159-2012 «Редукторы общемашиностроительного применения» значение $\psi = 8{,}7 \cdot 10^{-3}$ рад, что эквивалентно 0,5º [1].

Величины перекосов (расцентровок) осей в периоды эксплуатации судов зависят от ряда конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов.

В настоящем исследовании рассмотрены следующие научные задачи:

– определить причины возникновения перекосов осей соединительных валов судовых агрегатов и рассмотреть способы устранения их негативного влияния на судовые энергетические установки;

– исследовать процесс передачи механической энергии (эффективной мощности) в судовых энергетических установках через соединительный узел «главный двигатель → муфта → вал → муфта → редуктор» при перекосах осей соединительных валов судовых агрегатов с применением зубчатых муфт;

– сравнить удельный расход топлива и эффективный коэффициент полезного действия главной судовой энергетической установки в зависимости от углов перекосов осей соединительных валов судовых агрегатов при применении традиционных зубчатых муфт и муфт с комбинированной продольной модификацией зубьев.

Анализ литературных источников указывает на то, что одной из проблем, неизбежно возникающих в процессе эксплуатации судовых энергетических установок, является потеря эффективной мощности, вызванная перекосами осей соединительных валов механических агрегатов, при ее передаче от двигателя судовому валопроводу, через соединительный узел «муфта-вал-муфта» [2–5]. Указанные перекосы осей негативно влияют на работу судовой трансмиссии перегружая выходные и входные валы двигателя и редуктора соответственно, торсионные и промежуточные валы, фланцевые соединения, опорные подшипники, а также элементы валопровода, что в свою очередь негативно сказывается на показателях энергетической эффективности, а именно на повышении удельного расхода топлива и снижении эффективного коэффициента полезного действия [6, 7].

В настоящее время, вопрос устранения негативного влияния перекосов осей соединительных валов судовых агрегатов на работоспособность судовых энергетических установок осуществляется двумя способами:

– перецентровкой осей указанных валов, что требует остановки судна и значительных материальных затрат [8–11];

– применением компенсирующих устройств [12–15].

Практика эксплуатации и ревизии судовых энергетических установок показывает, что во время эксплуатации судов перекосы осей соединительных валов судовых агрегатов неизбежно увеличиваются. Это приводит к превышению установленных допускаемых норм центровки и способствует ухудшению эксплуатационных характеристик и технико-экономических показателей судовых машин и механизмов.

В настоящей статье за основу принято усовершенствование высокоэффективной зубчатой муфты с продольной модификацией как внешних, так и внутренних зубьев и предложена методика её расчёта.

Цель исследования – обосновать повышение параметров энергетической эффективности судовых механических установок путём устранения негативного влияния перекосов осей соединительных валов за счёт применения зубчатых муфт с комбинированной продольной модификацией зубьев.

Методы и материалы исследования

В целом теоретические исследования базируются на фундаментальных положениях трибологии общего и судового машиностроения с использованием подходов теоретической механики, деталей машин и основ конструирования. Функции распределения боковых зазоров, уравнения суммарной деформации и зависимости распределения усилий получены методом расчета нагрузочной способности зубчатых муфт. На основе метода нахождения дополнительных силовых факторов получены зависимости упругих изгибающих моментов в зубчатых муфтах, вызванных перекосами осей, от неуравновешенных усилий и сил трения в зацеплении. Определение коэффициентов трения в судовых зубчатых муфтах базировалось на методике расчета коэффициентов полезного действия на основе математической модели трения. Расход топлива и эффективный коэффициент полезного действия главных судовых агрегатов получены методами проектирования судовых газотурбинных агрегатов.

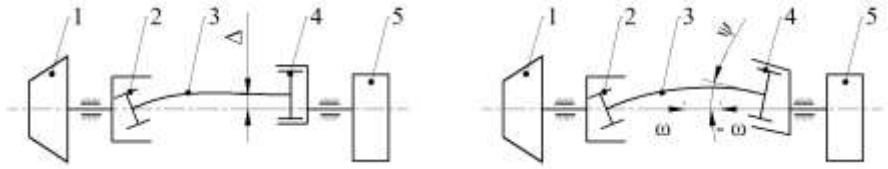
Объектом исследования в настоящей статье является процесс передачи механической энергии (эффективной мощности) в судовых энергетических установках через соединительный узел «главный двигатель → муфта → вал → муфта → редуктор» при перекосах осей соединительных валов судовых агрегатов.

Предметом исследования являются зависимости удельного расхода топлива и эффективного коэффициента полезного действия главной судовой энергетической установки от перекосов осей соединительных валов судовых агрегатов.

Результаты

Величины перекосов (расцентровок) осей в период эксплуатации судна зависят от ряда конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов. В качестве величин расцентровок, вызванных отклонениями в технологии изготовления и монтажа судовых энергетических установок и их элементов (рис. 1–4), как правило имеют место смещения осей и их слом, соответственно равны 0,05…0,1 мм и 0,1…0,2 мм/м. На рис. 1 изображён случай наблюдения биения (величина Δ) и перекос (угол ψ) зубьев зубчатой муфты (ЗМ), а на рис. 2 представлен случай одновременного биения и перекоса оси зубчатой втулки с внешними зубьями.

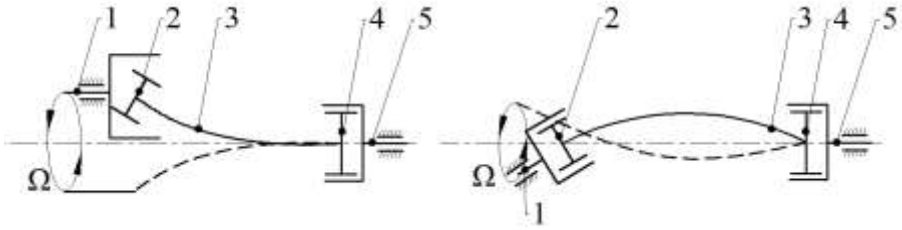
Наиболее опасным является случай, представленный на рис. 3, где наблюдается комбинация смещения и перекоса оси зубчатого механизма (возрастания углов перекоса осей валов). Случай, изображённый на рис. 4 отображает смещение и перекос оси двигателя, при этом наблюдается значительные величины перекосов осей соединительных валов [6–12, 15].



а) б)

1 – турбина; 2, 4 – зубчатые втулки; 3 – вал; 5 – редуктор

Рис. 1. Биение (а) и перекос (б) зубьев зубчатой муфты



а) б)

1 – вал; 2, 4 – зубчатые втулки; 3 – рессора; 5 – вал приводного механизма

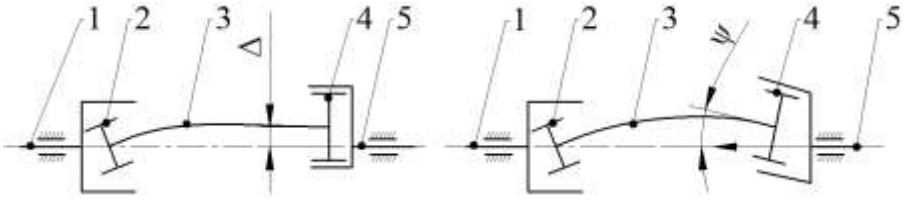
Рис. 2. Биение (а) и перекос (б) оси зубчатой втулки

Для выявления общего влияния деформации корпуса судна и размещения на нём устройств на соосность валов, были проведены измерения расцентровок осей ЗМ редукторных трансмиссий, при этом ЗМ не испытывали температурных влияний со стороны двигателей. В результате было установлено, что увеличение скорости хода судна или тяги на винте приводит к возрастанию величин расцентровок осей [10, 11, 15].

Наибольшей мерой на возрастание расцентровок осей влияют динамические принципы движения и конструкции специальных судов (гидрографических, исследовательских, носителях подводных аппаратов). Так, например, при подъёме судна «Джейран» с силовой установкой ГГТА ДТ-4 на воздушную подушку начальный угол перекоса осей $\psi = 6{,}0 \cdot 10^{-3}$ рад достиг величины $9{,}7 \cdot 10^{-3}$ рад, а при движении он вырос до $11{,}3 \cdot 10^{-3}$ рад. Кроме того в соединениях трансмиссий наблюдалась расцентровка по слому, которая превышала допустимую норму в 3-5 раз из-за недостаточной жёсткости фундамента, что требовало дополнительных мероприятий по корпусу и редукторам. Возрастание величин расцентровок осей соединительных валов судовых энергоустановок обусловлено возрастанием деформации корпуса и фундаментов на указанных типах судов, которые, как правило, изготовлены облегчёнными, в связи с чем, их вес в несколько раз меньше по сравнению с водоизмещающими судами [5, 9–11].

Известно, что допустимая несоосность при центрировании двигателей внутреннего сгорания на стапеле по сдвигу составляет 0,05 мм, а по слому – 0,10

мм/м; на плаву эти величины соответственно 0,15 мм и 0,20 мм/м. Центрирование газовых и паровых турбин определяется конструкцией судовых энергоустановок, в связи с чем, за базовый механизм должен быть принят, как правило, редуктор или главный упорный подшипник (ГУП).

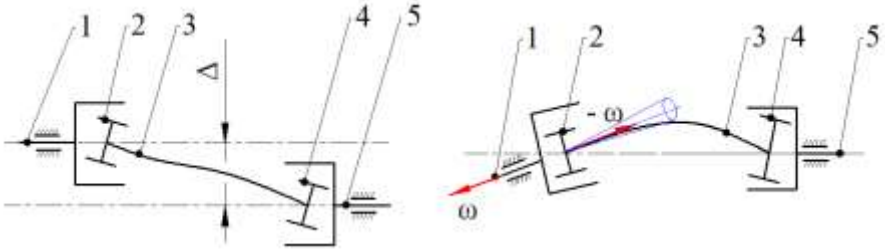


а) б)

1 – вал двигателя; 2, 4 – зубчатые втулки; 3 – рессора; 5 – вал приводного механизма

Рис. 3. Смещение (а) и перекос (б) оси зубчатого механизма

При установке зубчатой передачи её допустимая несоосность составит 0,05 мм и 0,15 мм/м. При монтаже паровых турбин их допускаемая несоосность с зубчатой передачей 0,15 мм и 0,20 мм/м. Несоосность по сдвигу для судов на подводных крыльях при центрировании зубчатой передачи и приводного вала колонки составит 0,05-0,10 мм, по суммарному слому (слом в двух взаимоперпендикулярных плоскостях) 1,35…1,45 мм/м [2, 5, 8–11, 15].



а) б)

1 – вал двигателя; 2, 4 – зубчатые втулки; 3 – рессора; 5 – вал приводного механизма

Рис. 4. Смещение (а) и перекос (б) оси двигателя

В среднем на одном судне, исходя из практики эксплуатации, на протяжении 4-5 лет начальные величины норм расцентровок осей соединительных валов увеличиваются и возрастают от 2 до 6 раз. Для приведения их в соответствие с допускаемыми нормами необходимо на протяжении всего срока эксплуатации судна осуществить от 4 до 5 перецентровок, что требует не только материальных затрат, а и сопровождается простоями судов и существенным снижением их грузо-пассажирооборота.

Анализируя вышесказанное, целесообразно рассматриваемую проблему дорогих перецентровок осей соединительных валов судовых машин и агрегатов решать с применением компенсирующих устройств, таких как зубчатые муфты [6–12, 15].

Зубчатая муфта представляет собой устройство, состоящее из втулки с внешними и обоймы с внутренними зубьями, которые находятся между собой в сцеплении, с передаточным отношением равным n = 1,0. Кроме передачи крутящего момента и частоты вращения осуществляется компенсацией расцентровок осей соединительных

валов, за счёт наличия между зубьями гарантированных величин радиальных и боковых зазоров.

В судовых энергетических установках водоизмещающих судов судовые механизмы размещаются, как правило, в местах соединения выходного вала двигателя и выходного вала редуктора. На специальных судах судовые механизмы размещают практически по всем направлениям передачи полезной нагрузки и частоты вращения.

Зубчатые муфты относятся к жёстким компенсирующим соединительным элементам и изготавливаются трёх типов (рис. 5), а именно с разъемной и неразъемной обоймой «муфта зубчатая» (МЗ) и с промежуточным валом «муфта зубчатая с промежуточным валом» (МЗП).

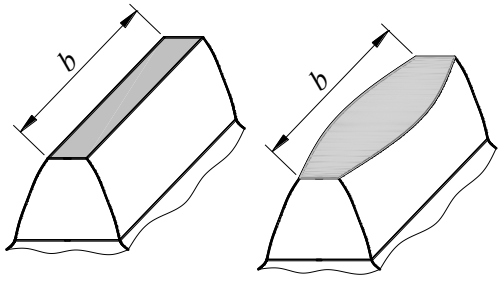


Муфта зубчатая Муфта с промежуточным валом

Рис. 5. Конструкции традиционных зубчатых муфт

Типы МЗ предназначены для непосредственного соединения валов и состоят из двух зубчатых втулок и обоймы. Тип МЗП предназначен для соединения валов с применением промежуточного вала и представляет собой комплекс из двух муфт, каждая из которых состоит из обоймы и фланцевой полумуфты [10, 11].

Традиционные зубчатые муфты (ГОСТ Р 50895-96 «Муфты зубчатые. Технические условия») независимо от типа и конструкции характеризуются прямыми образующими боковых поверхностей внешних и внутренних зубьев или бочкообразными внешними и прямыми внутренними образующими боковых поверхностей зубьев соответственно втулке к обойме (рис. 6).



а) б)

а) – прямые; б) – бочкообразные

Рис. 6. Эвольвентные зубья с образующими боковых поверхностей

На рис. 7 представлены развёртки сечений зубьев делительным цилиндром в положении без нагружения и при нагрузке без и с наличием перекоса, а расположение

внешнего и внутреннего зубьев в среднем ненагруженном состоянии представлены на рис. 8.

Для оценки влияния ЗМ повышенной эксплуатационной эффективности (рис. 8, а) на показатели энергоэффективности ГЭУ, к которым относятся удельные затраты топлива и эффективный КПД, проведены теоретические исследования газотурбинного агрегата (ГТЗА), с учётом перекосов осей соединительных валов на примере двухкаскадного ГТЗА UGT 15000 простой схеме по методике проектирования судовых турбоагрегатов [5]. Упомянутая методика не учитывает перекосы осей, в связи с чем, для оценки их влияния на работоспособность ГТЗА, следует при определении КПД передачи учесть зависимость

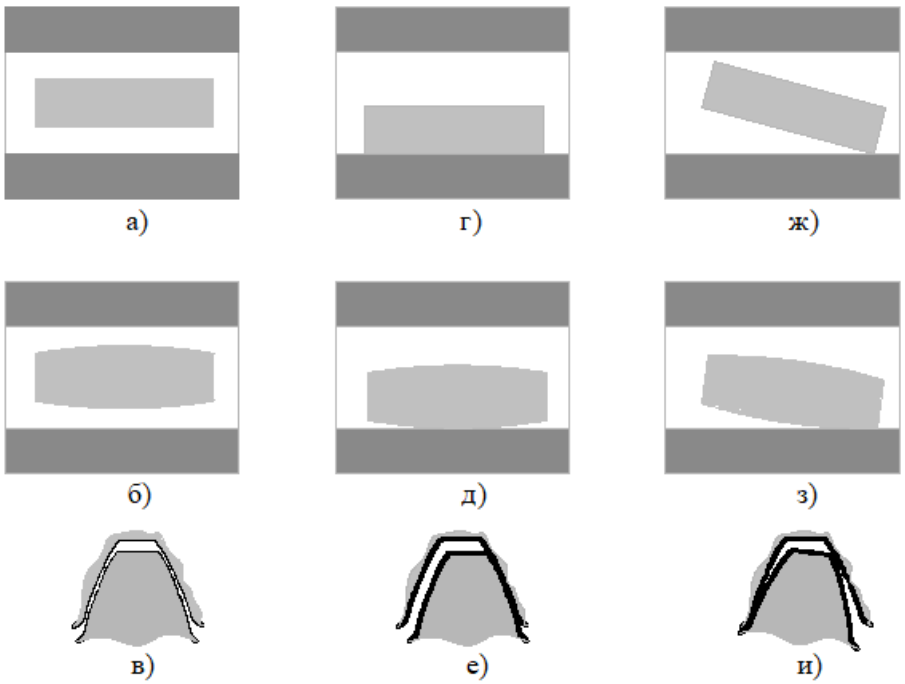
$$\eta = \eta_P \eta_{M_1} \eta_{M2}, \quad (1)$$

где η_P – КПД редуктора; η_{M1}, η_{M2} – КПД зубчатых муфт.

В общем виде зависимость коэффициента полезного действия в зависимости (1) имеет вид

$$\eta = 1 - \phi_0, \quad (2)$$

здесь ϕ_0 – коэффициент потерь, которые характеризуются отношением мощности затрат (потребляемой) $N_{ПОТ}$ к полезной мощности N.



а), б), в) – положение без нагрузки;
г), д), е) – при наличии нагрузки и отсутствии перекоса;
ж), з), и) – при нагружении и наличии перекоса

Рис. 7. Развертка сечений зубьев делительным цилиндром

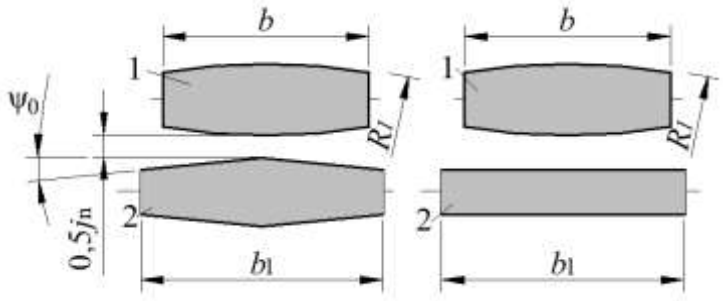
Для определения полезной мощности N целесообразно использовать общеизвестные зависимости [10]

$$F_t = \frac{2T}{dz} = \frac{2T}{mz^2}; T = 9550\frac{N}{n} v = \omega r = \frac{\pi dn}{60},$$

исходя из которых уравнение полезной мощности в рассматриваемом случае примет вид

$$N = \frac{mz^2 \omega F_t}{2 \cdot 10^3}, \quad (3)$$

здесь $d = mz$ – диаметр зубчатой муфты; r – радиус зубчатой муфты; n – частота вращения зубчатой муфты, мин$^{-1}$; ω – угловая скорость, с$^{-1}$.



а) б)

а) зубчатая муфта повышенной эксплуатационной эффективности;
б) традиционная муфта (ГОСТ)

Рис. 8. Схематическое расположение внешнего 1 и внутреннего 2 зубьев в среднем ненагруженном состоянии

Мощность затрат может быть представлена, как [10, 12]

$$N_{\text{ПОТ}} = \frac{f_{\text{ТР}}}{10^3} \sum F_n(\varphi) v_{\text{СК}}(\varphi), \quad (4)$$

где $v_{\text{СК}}(\varphi) = \omega r \psi \cos\varphi$ – скорость скольжения внешних зубьев втулки относительно внутренних зубьев обоймы, вызванная перекосом осей соединительных валов; $f_{\text{ТР}}$ – коэффициент трения, лежит в пределах {0,045; …;0,060} [11].

Сумма элементов усилий $F_n(\varphi)$ для всех контактируемых зубьев на соответствующих скоростях скольжения $v_{\text{СК}}$ имеет вид

$$\sum F_n(\varphi) v_{\text{СК}}(\varphi) = 4\int_0^{\gamma} \omega_n(\varphi) v_{\text{СК}}(\varphi) d\varphi, \quad (5)$$

здесь $\omega_n(\varphi) = \frac{zFn(\varphi)}{2\pi}$ – интенсивность нормальных усилий, Н/рад.

Исходя из уравнения, которое характеризует распределение нормальных усилий между сопряженными парами зубьев

$$F_n(\varphi) = \frac{\pi F_t}{2\gamma \cos\alpha_w} - \left(\frac{R_1}{\cos\alpha_w} - \frac{mz\alpha_w}{2}\right)\frac{\psi^2}{2\delta_\Sigma}\left(\frac{1}{2} + \frac{\sin 2\gamma}{4\gamma} - \cos^2\varphi\right) + \\ + \frac{R_1 \psi_0 \psi}{\delta_\Sigma F_t}\left(\frac{\sin\gamma}{\gamma} - \cos\varphi\right) + \frac{mz\psi^2}{8\delta_\Sigma}\left(\frac{\sin^2\gamma}{\gamma} - \sin 2\varphi\right), \quad (6)$$

и учитывая выражения (3)-(5), отбросив промежуточные значения КПД зубчатой муфты повышенной эксплуатационной эффективности, значение ϕ_0 в уравнении (2) можно записать как

$$\varphi_0 = \frac{2\psi f_{\text{TP}}}{\cos\alpha_w}\left\{\begin{array}{l}\dfrac{\pi\sin\gamma}{2\gamma}+\dfrac{R\psi^2}{4\delta_\Sigma F_t}\left[\left(1-\dfrac{\sin\gamma}{\gamma}\right)\dfrac{\sin 2\gamma}{2}+\gamma-\sin\gamma\right]+\\ +\dfrac{R\psi_0\psi}{\delta_\Sigma F_t}\left(\dfrac{\sin^2\gamma}{\gamma}-\dfrac{\gamma}{2}-\dfrac{\sin 2\gamma}{4}\right)\end{array}\right\} \quad (7)$$

В случае перекоса осей при котором все сопряжённые пары зубьев передают полезную нагрузку, для угла $\gamma = \dfrac{\pi}{2}$ уравнение (2) с учётом (7) примет вид

$$\eta = 1-\frac{2\psi f_{\text{TP}}}{\cos\alpha_w}\left[1+(\pi-2)\frac{R\psi^2}{8\delta_\Sigma F_t}-(\pi^2-8)\frac{R\psi_0\psi}{4\pi\delta_\Sigma F_t}\right] \quad (8)$$

При угле перекоса $\psi_0 = 0$ выражения (7) и (8) сводятся к зависимостям, характерных для традиционных зубчатых передач с бочкообразными внешними и прямыми внутренними зубьями [8-10]:

$$\eta = 1-\frac{2\psi f_{\text{TP}}}{\cos\alpha_w}\left\{\frac{\pi\sin\gamma}{2\gamma}+\frac{R\psi^2}{2\delta_\Sigma F_t}\left[\left(1-\frac{\sin\gamma}{\gamma}\right)\frac{\sin 2\gamma}{\gamma}+\gamma-\sin\gamma\right]\right\}; \quad (9)$$

$$\eta = 1-\frac{2\psi f_{\text{TP}}}{\cos\alpha_w}\left[1+(\pi-2)\frac{R\psi^2}{8\delta_\Sigma F_t}\right], \quad (10)$$

При выводе уравнений (4), (5), (7) и (8) составляющие $\dfrac{mz\alpha_w\psi^2}{4\delta_\Sigma}$ и $\dfrac{mz\psi^2}{8\delta_\Sigma}$, которые входят в функцию $F_n(\varphi)$, описанную уравнением (6), не учитываются ввиду их малых величин по сравнению с другими составляющими. Кроме того, указанные составляющие имеют разные знаки и один порядок.

При определении КПД передачи с использованием традиционных ЗМ следует использовать зависимости (9) и (10) подставив их в (1); с применением высокоэффективных ЗМ в формулу (1) нужно подставить (7) и (8). Зависимости (7)–(10) являются базовыми для определения показателей энергоэффективности ГТЗА, с учётом перекосов осей соединительных валов.

Для апробации в исследовании рассмотрен двигатель со следующими характеристиками:

- мера повышения давления воздуха в цикле $\pi_{k\Sigma} = 24$;
- максимальная температура газа в цикле $T_z = 1500$ К;
- эффективная мощность $N_e = 16500$ кВт;
- частота вращения ведомого вала $n = 5200$ мин$^{-1}$;
- низшая теплотворная способность углеводородного топлива $H_u = 42915 \ \dfrac{\text{кДж}}{\text{кг}}$;

параметры зубчатых муфт:

- число зубьев $z = 50$;
- модуль $m = 6$ мм;

– угол сцепления $\alpha_w = 20^0$;

– радиус бочкообразности внешних зубьев $R = 2900$ мм.

Удельный расход топлива ГТЗА рассчитывается по зависимости [5]:

$$g_e = \frac{G}{N}, \tag{11}$$

здесь G – удельный расход топлива ГТД за 1 час, $\frac{\text{кг}}{\text{ч}}$.

Эффективный КПД ГТЗА исходя из [2] и с учётом зависимости (11)

$$\eta_e = \frac{3600}{g_e \cdot H_u} \tag{3}$$

Результаты исследования влияния перекосов осей соединительных валов на удельный расход топлива ГТЗА, определяемого по зависимости (11) для традиционных зубчатых муфт (ТЗМ) и зубчатых муфт повышенной эксплуатационной эффективности (ЗМПЭЭ) представлены в табл. 1. Влияние углов перекоса осей на эффективный КПД ГТЗА при использовании ТЗМ и ЗМПЭЭ определено по зависимости (12); результаты представлены в табл. 2.

Таблица 1

Влияние углов перекоса осей ψ на удельный расход топлива ГТЗА g_e

$\psi \cdot 10^3$, рад	G, $\frac{\text{кг}}{\text{ч}}$; традиционная зубчатая муфта	G; $\frac{\text{кг}}{\text{ч}}$, зубчатая муфта повышенной эксплуатационной эффективности	g_e, $\frac{\text{гр}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$; традиционная зубчатая муфта	g_e, $\frac{\text{гр}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$; зубчатая муфта повышенной эксплуатационной эффективности
2,5	3728,55	3728,55	0,226	0,226
3,0	3729,30	3728,55	0,226	0,226
3,5	3730,07	3729,30	0,226	0,226
4,0	3730,83	3730,07	0,226	0,226
4,5	3731,60	3730,07	0,226	0,226
5,0	3732,35	3730,83	0,226	0,226
5,5	3733,11	3731,60	0,226	0,226
6,0	3734,64	3732,35	0,226	0,226
6,5	3735,41	3732,35	0,226	0,226
7,0	3736,55	3733,11	0,226	0,226
7,5	3738,08	3733,88	0,227	0,226
8,0	3740,39	3734,64	0,227	0,226
8,5	3741,91	3735,41	0,227	0,226
9,0	3744,22	3736,55	0,227	0,226
9,5	3746,52	3737,32	0,227	0,226
10,0	3748,83	3738,08	0,227	0,227
10,5	3751,91	3738,85	0,227	0,227
11,0	3754,62	3740,39	0,228	0,227
11,5	3757,70	3741,15	0,228	0,227
12,0	3761,57	3742,68	0,228	0,227
12,5	3765,45	3744,22	0,228	0,227

Таблица 2

Влияние углов перекоса осей ψ на эффективный КПД ГТЗА η_e

$\psi \cdot 10^3$, рад	ψ, град	η, традиционная зубчатая муфа	η, зубчатая муфта повышенной эксплуатационной эффективности	η, редуктор с традиционной муфтой	η, редуктор с зубчатой муфтой повышенной эксплуатационной эффективности	η_e, ГТЗА с традиционная зубчатая муфта	η_e, ГТЗА с зубчатая муфта повышенной эксплуатационной эффективности
2,5	0,14	0,990	0,990	0,970	0,970	0,367	0,367
3,0	0,17	0,990	0,990	0,969	0,970	0,367	0,367
3,5	0,20	0,990	0,990	0,969	0,969	0,367	0,367
4,0	0,23	0,989	0,990	0,969	0,969	0,367	0,367
4,5	0,26	0,989	0,990	0,969	0,969	0,367	0,367
5,0	0,29	0,989	0,989	0,969	0,969	0,367	0,367
5,5	0,32	0,989	0,989	0,968	0,969	0,367	0,367
6,0	0,34	0,989	0,989	0,968	0,969	0,367	0,367
6,5	0,37	0,989	0,989	0,968	0,969	0,367	0,367
7,0	0,40	0,989	0,989	0,968	0,968	0,367	0,367
7,5	0,43	0,988	0,989	0,967	0,968	0,367	0,367
8,0	0,46	0,988	0,989	0,967	0,968	0,366	0,367
8,5	0,49	0,988	0,989	0,966	0,968	0,366	0,367
9,0	0,52	0,988	0,989	0,966	0,968	0,366	0,367
9,5	0,54	0,987	0,989	0,965	0,967	0,366	0,367
10,0	0,57	0,987	0,988	0,964	0,967	0,365	0,367
10,5	0,60	0,987	0,988	0,964	0,967	0,365	0,366
11,0	0,63	0,986	0,988	0,963	0,967	0,365	0,366
11,5	0,66	0,986	0,988	0,962	0,966	0,365	0,366
12,0	0,69	0,985	0,988	0,961	0,966	0,364	0,366
12,5	0,72	0,985	0,988	0,960	0,966	0,364	0,366

Обсуждение результатов

При использовании зубчатых муфт повышенной эксплуатационной эффективности в составе судовых газотурбинных установок, которые работают в условиях перекоса осей соединительных валов судовых агрегатов наблюдается уменьшение затрат эффективной мощности через соединительный узел «муфта ↔ вал ↔ муфта» по сравнению с традиционными, увеличение эффективного коэффициента полезного действия и уменьшение удельного расхода топлива.

На практике, углы перекосов осей соединительных валов судовых агрегатов достигают величины порядка $\psi = (5…12,5)\cdot10^{-3}$ рад. Согласно ГОСТ Р 50895-96 «Муфты зубчатые. Технические условия», традиционные ЗМ теряют работоспособность при углах перекоса $\psi = 8,7\cdot10^{-3}$ рад, а работоспособность ЗМ повышенной эксплуатационной эффективности остаётся на удовлетворительном

уровне даже при увеличении углов перекоса до $\psi \le (10\ldots12{,}5)\cdot10^{-3}$ рад. Кроме того, при перекосе осей соединительных валов в ЗМ возникают изгибающие моменты от действия неуравновешенных сил и трения, которые вызывают дополнительные напряжения валопровода, опорных подшипников, а также ведущих и ведомых валов двигателя и редуктора, уменьшая этим ресурс ГТЗА и, как следствие, снижают общую эффективность судовой энергетической установки. В предложенных ЗМ с равномерным распределением усилий между всеми парами зубьев наблюдается уменьшение величины упругих моментов в 1,25…2,53 раза, при углах перекоса осей $\psi = (5\ldots10)\cdot10^{-3}$ рад, в сравнении с традиционными.

Значительное уменьшение величин упругих моментов приводит к снижению дополнительной нагрузки на элементы валопровода, что также существенно отображается на улучшении эксплуатационных показателей судовой энергетической установки.

Таким образом, целесообразно продолжить исследования новых конструкций ЗМ повышенной эксплуатационной эффективности с комбинированной продольной модификацией боковых образующих поверхностей их зубьев.

Заключение

Установлено, что перекосы осей соединительных валов судовых турбозубчатых агрегатов приводят к потере эффективной мощности при её передаче от главного двигателя к судовому валопроводу и, как следствие, негативно влияет на показатели энергоэффективности судовых газотурбинных установок в частности, и технико-экономические судна в целом.

Для усовершенствования взаимодействия элементов ГТЗА, за счёт уменьшения негативного влияния перекосов осей соединительных валов судовых агрегатов, рекомендуется применять зубчатые муфты повышенной эксплуатационной эффективности с продольной модификацией боковых образующих поверхностей, которые обеспечивают равномерное распределение усилий между сопряжёнными парами зубьев и, как следствие, обеспечивают нормы центровки.

Это, в свою очередь, приводит к увеличению эффективного коэффициента полезного действия энергетической установки и уменьшению удельного расхода топлива, уменьшению вероятности возникновения аварийной ситуации и внеплановых ремонтных работ. В результате увеличивается степень безотказной эксплуатации судна и уменьшаются затраты на диагностику, ремонт и стоимость обслуживания.

При углах перекоса осей $\psi = (5\ldots10)\cdot10^{-3}$ рад замена традиционных ЗМ предложенными в статье приведёт к снижению удельного расхода топлива ГТЗА на 0,05…0,6 $\frac{\text{г}}{\text{кВт}\cdot\text{ч}}$, экономии расхода топлива главного двигателя до 1,5…11 $\frac{\text{кг}}{\text{ч}}$ и повышению эффективного коэффициента полезного действия ГТЗА на 0,1…0,3 %, что эквивалентно 16,5…49,7 кВт.

Список литературы

1. Гапонов, В.С. Оценка остаточного ресурса зубчатой муфты газовой турбины / В. С. Гапонов, Ю.А. Остапчук // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ» : сб. науч. тр. Темат. вып. : Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. – Харьков : НТУ «ХПИ». – 2010. – № 2. – С. 98-101.
2. Голуб, В.П. Прогнозирование вибрационного состояния газоперекачивающего агрегата (ГПА) с авиационным газотурбинным двигателем, путем создания базы данных параметров центровки трансмиссии [Текст] / В.П. Голуб, В. К. Итбаев, Ю.В. Лукащук // Вестник УГАТУ. – Уфа – 2014. – № 4 (65). – С. 27–33.
3. Комаров, В.В. Конструктивные меры по обеспечению работоспособности двигательно-движительных установок на судах пр. 19614 типа «Н.Новгород» [Текст] / В.В. Комаров //

Вестник Астраханского государственного технического университета. 2005. – № 2 – С. 55– 62.
4. Vychuzhanin, V. Devising a method for the estimation and prediction of technical condition of ship complex systems / V. Vychuzhanin, N. Rudnichenko, V. Boyko, N. Shibaeva, S. Konovalov // ВЕЖПТ. 2016. №9 (84). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-metoda-otsenki-i-prognozirovaniya-tehnicheskogo-sostoyaniya-sudovyh-slozhnyh-sistem (дата обращения: 11.05.2026).
5. Никитин, В.С. Современное состояние и перспективы развития отечественных газотурбинных энергетических установок /В.С. Никитин, В.Н. Половинкин, В.В. Барановский// Труды Крыловского государственного научного центра, 2017. – № 3(381). – С. 75–90.
6. Безюков, О.К. Газотурбинные двигатели на флоте: история и перспективы / О.К. Безюков, В.А. Жуков, М.С. Капустянский // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 2. — С. 244–256. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-244-256.
7. Анцупов, В.П. Методика проектной оценки ресурса зубчатых муфт по критерию износостойкости / В.П. Анцупов, М.Г. Слободянский, А.В. Анцупов (мл) // Современные наукоемкие технологии, 2018. – № 7. С. 20–25; URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37072 (дата обращения: 11.05.2026).
8. Паламарчук, Т. Н. Влияния перекоса и расцентровки валов в пальцевых муфтах на энергетические характеристики роторных турбомашин / Т. Н. Паламарчук, Н.А. Чехлатый // Сборник научных трудов ДОНИЖТ, 2021. – №61. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyaniya-perekosa-i-rastsentrovki-valov-v-paltsevyh-muftah-na-energeticheskie-harakteristiki-rotornyh-turbomashin (дата обращения: 11.05.2026).
9. Ильичев, В.Ю. Исследование влияния расцентровки муфт роторов на интенсивность вибраций и осевые усилия / В. Ю. Ильичев // Инновационная наука, 2016. – №9(21). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-rastsentrovki-muft-rotorov-na-intensivnost-vibratsiy-i-osevye-usiliya (дата обращения: 11.05.2026).
10. Nobuo, K. Statistical Study on Reliability of Ship Equipment and Safety Management – Reliability Estimation for Failures on Main Engine System by Ship Reliability Database System [Text] / Kiriya Nobuo // Bulletin of the JIME. – 2001. – Vol. 29, No.2 – P. 64-70.
11. Дубов, Г.М. Обзор зубчатых зацеплений с различными профилями зубьев / Г.М. Дубов, Д.С. Трухманов, Е.С. Лопасова, И.Е. Ельцов, Р.А. Тимофеев, П.А. Фоминых // Вестник КузГТУ. 2018. №6 (130). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-zubchatyh-zatsepleniy-s-razlichnymi-profilyami-zubiev (дата обращения: 11.05.2026).
12. Киселев, Б.Р. Концепция триботехнического решения задачи повышения антифрикционных свойств зубчатых передач / Б.Р. Киселёв, А.А. Мельников // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2018. – №2 (54). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-tribotehnicheskogo-resheniya-zadachi-povysheniya-antifriktsionnyh-svoystv-zubchatyh-peredach (дата обращения: 11.05.2026).
13. Zhao J., Li Y., Liu Y., Huang W.& Xu Y., Tribology International 174, 107715 (2022).https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107715.
14. An Y., Spanjer W., Chezan T. & Heijne J. Journal of Materials Processing Technology 321, 118145 (2023). https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.118145.
15. Kraus M., Lenzen M. & Merklein M., Wear 476, 203679 (2021). https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203679.

References

1. Gaponov, V. S. Ocenka ostatochnogo resursa zubchatoj mufty` gazovoj turbiny` / V. S. Gaponov, Yu. A. Ostapchuk // Vestnik Nacz. texn. un-ta XPI : sb. nauch. tr. Temat. vy`p. : E`nergeticheskie i teplotexnicheskie processy` i oborudovanie. – Xar`kov : NTU XPI. – 2010. – № 2. – S. 98-101.
2. Golub, V.P. Prognozirovanie vibracionnogo sostoyaniya gazoperekachivayushhego agregata (GPA) s aviacionny`m gazoturbinny`m dvigatelem, putem sozdaniya bazy` danny`x parametrov centrovki transmissii [Tekst] / V.P. Golub, V. K. Itbaev, Yu.V. Lukashhuk // Vestnik UGATU. – Ufa – 2014. – № 4 (65). – S. 27–33.
3. Komarov, V.V. Konstruktivny`e mery` po obespecheniyu rabotosposobnosti dvigatel`no-dvizhitel`ny`x ustanovok na sudax pr. 19614 tipa «N.Novgorod» [Tekst] / V.V. Komarov // Vestnik Astraxanskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. 2005. – № 2 – S. 55– 62.

4. Vychuzhanin, V. Devising a method for the estimation and prediction of technical condition of ship complex systems / V. Vychuzhanin, N. Rudnichenko, V. Boyko, N. Shibaeva, S. Konovalov // VEZhPT. 2016. №9 (84). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-metoda-otsenki-i-prognozirovaniya-tehnicheskogo-sostoyaniya-sudovyh-slozhnyh-sistem (data obrashheniya: 11.05.2026).
5. Nikitin, V.S. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy` razvitiya otechestvenny`x gazoturbinny`x e`nergeticheskix ustanovok /V.S. Nikitin, V.N. Polovinkin, V.V. Baranovskij// Trudy` Kry`lovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra, 2017. – № 3(381). – S. 75–90.
6. Bezyukov, O. K. Gazoturbinny`e dvigateli na flote: istoriya i perspektivy` / O. K. Bezyukov, V. A. Zhukov, M. S. Kapustyanskij // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. — 2021. — T. 13. — № 2. — S. 244–256. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-244-256.
7. Anczupov, V.P. Metodika proektnoj ocenki resursa zubchaty`x muft po kriteriyu iznosostojkosti / V.P. Anczupov, M.G. Slobodyanskij, A.V. Anczupov (ml) // Sovremenny`e naukoemkie texnologii, 2018. – № 7. S. 20–25; URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37072 (data obrashheniya: 11.05.2026).
8. Palamarchuk, T. N. Vliyaniya perekosa i rascentrovki valov v pal`cevy`x muftax na e`nergeticheskie xarakteristiki rotorny`x turbomashin / T. N. Palamarchuk, N.A. Chexlaty`j // Sbornik nauchny`x trudov DONIZhT, 2021. – №61. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyaniya-perekosa-i-rastsentrovki-valov-v-paltsevyh-muftah-na-energeticheskie-harakteristiki-rotornyh-turbomashin (data obrashheniya: 11.05.2026).
9. Il`ichev, V. Yu. Issledovanie vliyaniya rascentrovki muft rotorov na intensivnost` vibracij i osevy`e usiliya / V. Yu. Il`ichev // Innovacionnaya nauka, 2016. – №9(21). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-rastsentrovki-muft-rotorov-na-intensivnost-vibratsiy-i-osevye-usiliya (data obrashheniya: 11.05.2026).
10. Nobuo, K. Statistical Study on Reliability of Ship Equipment and Safety Management –Reliability Estimation for Failures on Main Engine System by Ship Reliability Database System [Text] / Kiriya Nobuo // Bulletin of the JIME. – 2001. – Vol. 29, No.2 – P. 64-70.
11. Dubov, G.M. Obzor zubchaty`x zaceplenij s razlichny`mi profilyami zub`ev / G.M. Dubov, D.S. Truxmanov, E.S. Lopasova, I.E. El`czov, R.A. Timofeev, P.A. Fominy`x // Vestnik KuzGTU. 2018. №6 (130). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-zubchatyh-zatsepleniy-s-razlichnymi-profilyami-zubiev (data obrashheniya: 11.05.2026).
12. Kiselev, B.R. Koncepciya tribotexnicheskogo resheniya zadachi povy`sheniya antifrikcionny`x svojstv zubchaty`x peredach / B.R. Kiselyov, A.A. Mel`nikov // Sovremenny`e naukoemkie texnologii. Regional`noe prilozhenie. 2018. – №2 (54). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-tribotehnicheskogo-resheniya-zadachi-povysheniya-antifriktsionnyh-svoystv-zubchatyh-peredach (data obrashheniya: 11.05.2026).
13. Zhao J., Li Y., Liu Y., Huang W.& Xu Y., Tribology International 174, 107715 (2022).https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107715.
14. An Y., Spanjer W., Chezan T. & Heijne J. Journal of Materials Processing Technology 321, 118145 (2023). https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.118145.
15. Kraus M., Lenzen M. & Merklein M., Wear 476, 203679 (2021).https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203679.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ/ INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Терлыч Станислав Владимирович, кандидат технических наук, декан факультета судовождения и судовой энергетики, главный специалист научно-исследовательского сектора, Херсонская государственная морская академия (ФГБОУ ВО «ХГМА»), 273002, г. Херсон, проспект Ушакова, 20; доцент кафедры эксплуатации судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова (ФГБОУ ВО «ГМУ»), 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, проспект Ленина, 93,e-mail: rn6ay@yandex.ru

Stanislav V. Terlych, PhD in Engineering, Dean of the Faculty of Navigation and Marine Power Engineering, Chief Specialist of the Scientific Research sector, Kherson State Maritime Academy, 273002, Kherson, Ushakova Avenue, 20,

Associate Professor of the Department of Ship Mechanical Installations Operation, Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 93 Lenin Avenue, Novorossiysk, Krasnodar Region, 353924, e-mail: rn6ay@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 12.05.2026; принята к публикации 22.06.2026; опубликована онлайн 20.09.2026. Received 12.05.2026; published online 20.09.2026.

УДК 621.6.03
DOI: 10.37890/jwt.vi88.738

Теоретическая швартовная характеристика и оценка согласованности гребного винта и главного двигателя транспортных судов внутреннего плавания

О.П. Шураев
А.И. Самосюк
Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия.

Аннотация. Выполнен анализ зависимостей, позволяющих произвести построение семейства винтовых характеристик главных двигателей судов внутреннего плавания. Показано, что мощность двигателя при работе на установившемся режиме винтовой характеристики может быть представлена в виде произведения трех множителей: постоянной составляющей, определяемой диаметром гребного винта, плотностью воды и коэффициентами полезного действия валопровода и передачи; частоты вращения вала и коэффициента момента k_2. При этом, чем больше значение коэффициента момента k_2, тем более круто будет проходить винтовая характеристика. Коэффициент момента может быть определен как со стороны параметров работы двигателя, так и со стороны параметров винта и движения судна. Сопоставлением значений коэффициента момента «по двигателю» и по машинной диаграмме винта выполнена оценка согласованности гребного винта и главного двигателя для пассажирского теплохода проекта 588 и грузового теплохода проекта 576.

Ключевые слова: скоростные характеристики; винтовая характеристика; швартовная характеристика; топливо-мощностная характеристика; коэффициент момента

Theoretical mooring characteristics and evaluation of the consistency of the propeller and main engine of inland navigation transport vessels

Oleg P. Shurayev
Alina I. Samosyuk
Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. An analysis of the dependencies allowing the construction of a family of screw characteristics of the main engines of inland navigation vessels has been performed. It is shown that the engine power when operating in steady-state mode of the screw characteristic can be represented as a product of three multipliers: a constant component determined by the diameter of the propeller, the density of water and the efficiency coefficients of the shaft and transmission; shaft rotation speed and torque coefficient k_2. At the same time, the higher the value of the moment coefficient k_2, the more steeply the screw characteristic will pass. The torque coefficient can be determined both from the engine operation parameters and from the parameters of the propeller and ship movement. By comparing the values of the torque coefficient «according to the engine» and according to the machine diagram of the propeller, an assessment of the consistency of the propeller and the main engine for the passenger ship of project 588 and the cargo ship of project 576 was carried out.

Keywords: speed characteristics; screw characteristic; mooring characteristic; fuel-power characteristic; torque coefficient

Введение

В процессе постройки и эксплуатации судов внутреннего плавания возникает необходимость проведения швартовных испытаний. Это могут быть регламентированные Правилами РКО испытания или испытания «внутренние», организованные заинтересованными сторонами с целью определения или уточнения параметров главных двигателей, например, нагрузочных или экологических. Нагружение главного двигателя в ходе таких испытаний осуществляется по швартовной характеристике. Для назначения режимов работы двигателя необходимо построить швартовную характеристику в координатах «мощность – частота вращения» («крутящий момент – частота вращения»). Целью исследования является разработка методики, позволяющей выполнить такое построение, и ее апробация для судов разных типов.

Скоростные характеристики двигателя

На установившемся режиме нагрузка главного двигателя судна определяется его мощностью (крутящим моментом) и частотой вращения вала. Зависимость параметров рабочего процесса на установившихся режимах от одного из параметров, взятого за аргумент, принято называть характеристикой двигателя. Если в качестве независимого параметра (аргумента) выбрана частота вращения n, то такие характеристики называются скоростными. В группу скоростных входят характеристики, получаемые при неизменных положениях рейки топливных насосов высокого давления (ТНВД). Они характеризуют возможность развивать некоторую мощность при заданной частоте вращения вала двигателя, поэтому назовем их ***топливно-мощностные***[6]. Другим семейством группы скоростных характеристик являются винтовые характеристики, получаемые при работе двигателя на гребной винт или имитирующее его устройство. Пересечение мощностной характеристики (при текущей цикловой подаче топлива) с винтовой характеристикой, зависящей от установленного гребного винта и внешних условий его работы, определяет режим работы двигателя, характеризуемый на диаграмме в координатах «мощность – частота вращения» или «крутящий момент – частота вращения» рабочей точкой. *Номинальной* рабочей точке соответствует *номинальная* частота вращения вала и *номинальная* мощность двигателя

Оценка согласованности гребного винта и главного двигателя

Винтовая характеристика, проходящая через номинальную рабочую точку, называется нормальной. Зависимость мощности при работе двигателя на винт описывается формулой

$$P_e = \frac{2 \cdot \pi \cdot \rho_{\text{в}} \cdot k_2 \cdot D_{\text{ГВ}}^5 \cdot n_{\text{ГВ}}^3}{\eta_{\text{П}} \cdot \eta_{\text{В}}}, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{в}}$ – плотность воды; k_2 – коэффициент момента гребного винта; $D_{\text{ГВ}}$ – диаметр гребного винта; $n_{\text{ГВ}}$ – частота вращения гребного винта (при прямой передаче равна частоте вращения коленчатого вала, при зубчатой – пропорциональна); $\eta_{\text{П}}$ и $\eta_{\text{В}}$ – КПД передачи и валопровода соответственно.

[6] Используемые в отечественной литературе названия характеристик «внешние» и «частичные» мы считаем неудачными, так как, во-первых, для одного семейства характеристик используются разные термины, а во-вторых, названия не отражают смысл зависимостей, состоящий в величине мощности при данной подаче топлива на заданной частоте вращения вала двигателя.

КПД зубчатой передачи (при ее наличии) и валопровода, как правило, имеют значения (0.95…0.98) и мало зависят от частоты вращения, поэтому при оценочном анализе винтовых характеристик ими можно пренебречь.

Обозначая неизменные компоненты формулы (1) в виде константы C

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \rho_{\text{в}} \cdot D_{\text{ГВ}}^5}{\eta_{\text{П}} \cdot \eta_{\text{В}}} = const, \quad (2)$$

получим уравнение винтовой характеристики

$$P_e = C \cdot k_2 \cdot n_{\text{ГВ}}^3. \quad (3)$$

Согласно уравнению (3), вид винтовой характеристики будет зависеть только от коэффициента k_2, причем, чем больше его значение – тем более круто будет проходить винтовая характеристика. При известных значениях константы C, номинальной мощности P_e и номинальной частоты вращения $n_{\text{ГВ}}$ из формулы (3) можно вычислить коэффициент $k_{2\text{E}}$ для номинального режима работы двигателя

$$k_{2E} = \frac{P_e}{C \cdot n_{\text{ГВ}}^3}. \quad (4)$$

С другой стороны, коэффициент k_2 может быть определен по известным в справочной литературе диаграммам Э.Э. Папмеля [1] для расчета гребных винтов, в частности, по машинной диаграмме, используемой при известном значении мощности, потребляемой винтом, а также частоты его вращения, то есть, в конечном итоге, при заданных параметрах двигателя. Для расчета определяется относительная поступь λ для винта с заданным количеством лопастей z, дисковым отношением θ, шаговым отношением H/D. При этом необходимо учитывать тип движителя (открытый винт или винт в направляющей насадке).

В пособии [2] предложена аппроксимация диаграммам Э.Э. Папмеля полиномами вида

$$k_2(HD, \lambda) = C_1 + C_2 \cdot HD + C_3 \cdot \lambda + C_4 \cdot HD^2 + C_5 \cdot HD \cdot \lambda + C_6 \cdot \lambda^2 + C_7 \cdot HD^3 + \\ + C_8 \cdot \lambda^2 \cdot HD + C_9 \cdot \lambda^3 + C_{10} \cdot HD^2 \cdot \lambda^2, \quad (5)$$

где C_i – аппроксимационные коэффициенты для винтов с заданным количеством лопастей z и дисковым отношением θ.

Согласно формуле (5), в которой для винтов фиксированного шага отношение H/D постоянно, коэффициент k_2 будет зависеть только от относительной поступи λ.

Относительная поступь определяется по выражению

$$\lambda = \frac{w}{n_{\text{ГВ}} \cdot D_{\text{ГВ}}}, \quad (6)$$

где w – скорость потока воды, натекающего на винт, которая вычисляется по формуле

$$w = v \cdot (1 - \psi). \quad (7)$$

где v – скорость судна; ψ – коэффициент попутного потока.

«Коэффициент попутного потока можно определить, если известно поле скоростей в диске движителя, которое принципиально можно получить в результате расчета пограничного слоя на корпусе судна. Однако существующие способы такого расчета достаточно трудоемки. Поэтому влияние корпуса на эффективность работы гребного винта обычно находится экспериментальным путем из сопоставления результатов испытаний гребного винта в свободной воде и в составе корпуса судна.» [3]. Известны [4, 5] эмпирические формулы, позволяющие выполнить оценку коэффициента попутного потока для различного типа судов.

Таким образом, может быть определен коэффициент момента $k_{2р}$ исходя из параметров винта и условий его работы.

Сопоставление коэффициентов для винта $k_{2р}$ и для двигателя k_{2E} позволяет оценить согласованность винта и двигателя. Если выполняется условие

$$k_{2p} \cong k_{2E}, \tag{8}$$

то винт считается согласованным, такие винты принято называть «нормальными». Соответственно, в случае справедливости выражения

$$k_{2E} > k_{2p}, \tag{9}$$

мы получим гидродинамически «легкий» винт, а если будет справедливо неравенство

$$k_{2E} < k_{2p}, \tag{10}$$

– гидродинамически «тяжелый» винт.

Примеры оценки согласованности винтов

Выполним расчет швартовной характеристики для пассажирского теплохода проекта 588 и грузового теплохода проекта 576 (рис. 1). Выбор этих судов обусловлен тем, что они строились достаточно большой, даже по меркам Советского Союза, серией, их характеристики неоднократно проверялись в ходе испытаний и известны широкому кругу специалистов, и приведены в Руководстве по теплотехническому контролю [6]. Также на эти суда устанавливались двигатели одной серии 6NVD48, что позволяет выполнить сравнение швартовных характеристик. Пассажирские теплоходы проекта 588 оснащались тремя двигателями, а грузовые суда – двумя. Номинальная мощность одного двигателя 294 кВт при частоте вращения вала 275 об./мин. Каждый двигатель работает непосредственно на свой винт, только на пассажирском судне винты открытые, а на грузовом – в неподвижных насадках. Винты на указанных судах также имеют одинаковые или близкие параметры (табл. 1).

Таблица 1

Параметры винтов пассажирского (проект 588) и грузового (проект 576) теплоходов

Параметр	Размерность	Значение	
		Проект 588	Проект 576
Тип винта	-	открытый	в неподвижной насадке
Количество лопастей, z	-	4	4
Дисковое отношение, θ	-	0,55	0,55
Диаметр, D	мм	1600	1590
Шаг, H	м	2,02	1,92
Шаговое отношение, H/D	-	1,262	1,208

На рисунке 2 приведены зависимости скорости судна v, км/ч, и суммарной мощности главной энергетической установки $P_{e\Sigma}$, кВт, для пассажирского теплохода проекта 588 и грузового теплохода проекта 576 от частоты вращения n, взятые из Руководства по теплотехническому контролю [6].



Рис. 1. Пассажирский теплоход проекта 588 (вверху) и грузовой теплоход проекта 576

С помощью программы-дигитайзера GetData эти кривые были оцифрованы и аппроксимированы полиномиальной зависимостью. Для описания зависимости мощности от частоты вращения выбрано уравнение третьей степени, а зависимость скорости судна от частоты вращения винтов описана линейным уравнением

проект 588

$$P_{e\Sigma} = 0.000185 \cdot n^3 - 0.079763 \cdot n^2 + 13.602853 \cdot n - 709.7, \quad (11)$$

коэффициент детерминации R^2=0,994,

$$v = 0.0841 \cdot n + 1.654, (R^2 = 0{,}999); \quad (12)$$

проект 576

$$P_{e\Sigma} = -0.00001 \cdot n^3 - 0.03101 \cdot n^2 + 7.99128 \cdot n + 620.53, \quad (R^2 = 0{,}999) \quad (13)$$

$$v = 0.0617 \cdot n + 1.989, (R^2 = 0{,}999). \quad (14)$$

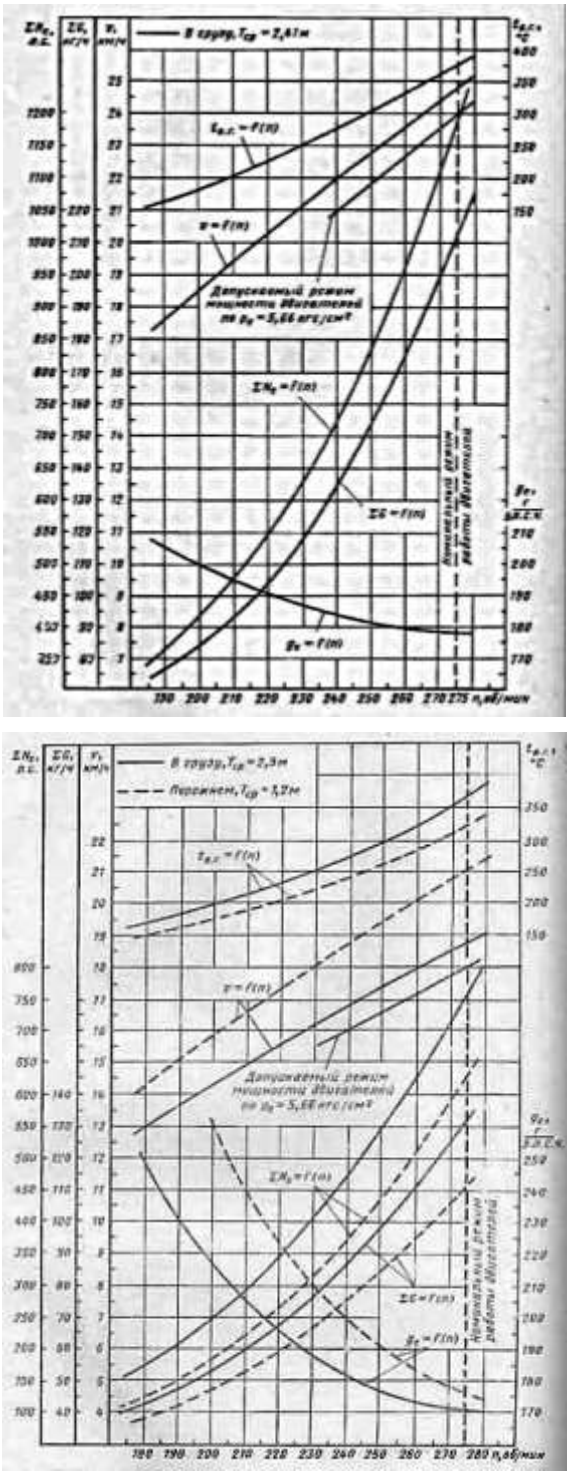


Рис. 2. Зависимости скорости судна и суммарной мощности главной энергетической установки от частоты вращения для пассажирского теплохода проекта 588 (вверху) и грузового теплохода проекта 576 (внизу) согласно [6]

Корпуса пассажирского и грузового теплоходов при схожих главных размерениях, конечно же, различаются, что приводит к разным значениям коэффициента попутного потока. Оценка коэффициента попутного потока, определяемого согласно [7], для теплохода проекта 588 составляет ψ= 0.11, а для теплохода проекта 576 - ψ= 0.26. Скорость набегания потока воды на винт, определяемая по формуле (7), будет равна: для проекта 588 $w = 6{,}125$ м/с, для проекта 576 $w = 3{,}895$ м/с. Относительная поступь, рассчитанная по формуле (6), для пассажирского и грузового теплоходов, $\lambda = 0{,}835$ и $\lambda = 0{,}535$ соответственно. Тогда, для теоретической номинальной винтовой характеристики коэффициент k_2, рассчитанный «по двигателю» (формула (4)), для пассажирского теплохода $k_{2E} = 0{,}0457$, а для грузового теплохода $k_{2E} = 0{,}0471$.

Для расчета коэффициента момента k_2 по диаграммам Папмеля воспользуемся их аппроксимацией уравнением (5). В таблице 2 приведены значения аппроксимационных коэффициентов для винтов с z = 4, θ = 0,55, открытого и в насадке.

Таблица 2

Коэффициенты аппроксимации в уравнении (5) согласно [2]

Коэффициент	Значение для открытого винта с $z = 4$, θ = 0,55	Значение для винта в насадке с $z = 4$, θ = 0,55
C_1	-0.001750186	0.034230315
C_2	0.012445675	-0.083384194
C_3	0.000244777	0.006949658
C_4	0.055554854	0.105885305
C_5	-0.029986548	-0.028115195
C_6	-0.014026910	-0.015812053
C_7	-0.007269725	-0.014283056
C_8	-0.007686874	0.029349117
C_9	-0.006060740	-0.028368415
C_{10}	0.008546909	-0.00444762

Согласно аппроксимационному уравнению (5) коэффициенты момента для пассажирского теплохода $k_{2p} = 0{,}0459$, а для грузового теплохода $k_{2p} = 0{,}0479$. Сравнение полученных величин и коэффициенты момента приведены в табл. 3.

Таблица 3

Расчетные величины в режиме номинальной винтовой характеристики

Параметр	Размерность	Теплоход проекта 588	Теплоход проекта 576
Коэффициент попутного потока ψ	-	0.11	0.26
Скорость набегания потока на винт	м/с	6.125	3.895
Относительная поступь	-	0.835	0.535
Коэффициент k_{2E} для двигателя	-	0.0457	0.0471

Параметр	Размерность	Теплоход проекта 588	Теплоход проекта 576
(формула (4))			
Коэффициент $k_{2р}$ для винта по диаграммам Папмеля, (формула (5))	-	0.0459	0.0479

Расхождение между полученными значениями коэффициентов момента в обоих случаях не превышает 1,5%, что с учетом погрешностей, накопленных при аппроксимации графиков, позволяет признать винты согласованными для судов каждого проекта.

Построение швартовной характеристики для пассажирского и грузового теплоходов

Швартовная характеристика является наиболее гидродинамически тяжелой винтовой характеристикой, но также описываемой уравнениями вида (1) и (3). Ключевым отличием швартовной характеристики будет равенство нулю скорости судна, а следовательно, и равенство нулю, согласно формуле (6), относительной поступи винта λ. При уменьшении относительной поступи коэффициент момента k_2 увеличивается. Максимальным значение k_2 будет когда судно неподвижно, то есть при работе по швартовной характеристике: $k_{2ш} = k_{2max}$. Это условие и будет ключевым при построении швартовной характеристики. В уравнение (5) подставим $\lambda = 0$ и рассчитаем для каждого судна коэффициенты момента $k_{2ш}$ при работе по швартовной характеристике: для пассажирского теплохода $k_{2ш} =$ 0.088 и для грузового теплохода $k_{2ш} =$ 0.063.

Для построения швартовных характеристик для каждого рассматриваемого теплохода использовано уравнение швартовной характеристики

$$P_{e_ш} = k_{2ш} \cdot C \cdot n^3. \quad (15)$$

Сопоставляя это уравнение с уравнением нормальной винтовой характеристики (3), записанным для номинального режима работы двигателя,

$$P_{e_{ном}} = k_2 \cdot C \cdot {n_{ном}}^3, \quad (16)$$

получим уравнение швартовной характеристики в виде уравнения (17), где отношение коэффициентов момента на швартовной и номинальной винтовой характеристиках показывает величину «утяжеления» швартовной характеристики по отношению к номинальной. Она составила 1.92 для пассажирского теплохода и 1.33 для грузового.

$$P_{e_ш} = \frac{k_{2ш}}{k_2} \cdot P_{e_{ном}} \cdot \left(\frac{n}{n_{ном}}\right). \quad (17)$$

В результате стало возможным построение теоретической швартовной характеристики в координатах «мощность двигателя – частота вращения вала» (рис. 3, 4 линия 5-1). Выше линии, соответствующей внешней характеристике максимальной мощности (линия 3-5, на рис. 3, 4), работа по швартовной характеристике невозможна, а максимально допустимая частота вращения будет определяться на пересечении швартовной характеристики и ограничительной по номинальному крутящему моменту (точка S, на рис. 3, 4).

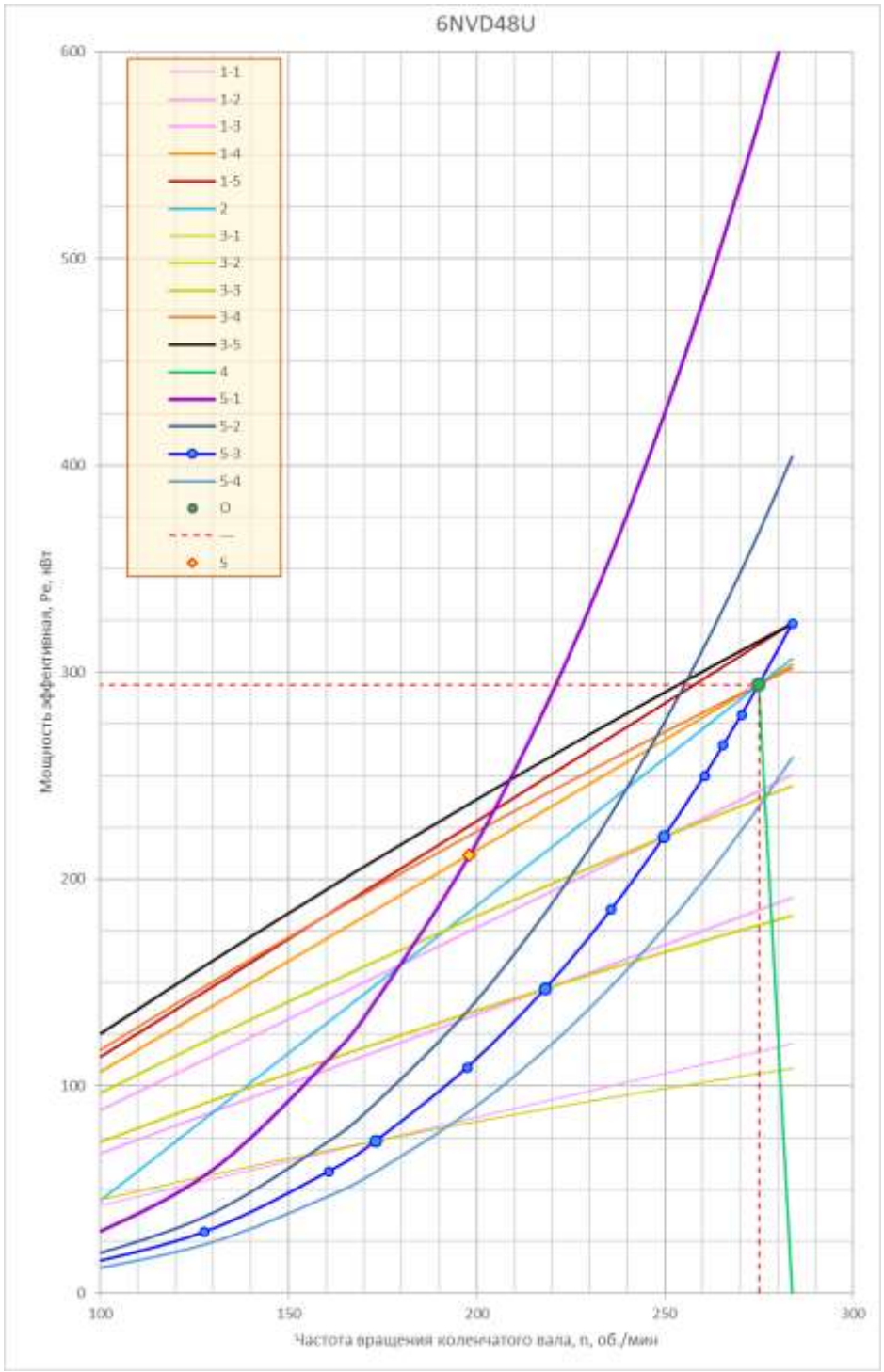


Рис. 3. Характеристики двигателя 6NVD48 на пассажирском теплоходе проекта 588 с открытым винтом (обозначение линий см. в таблице 4)

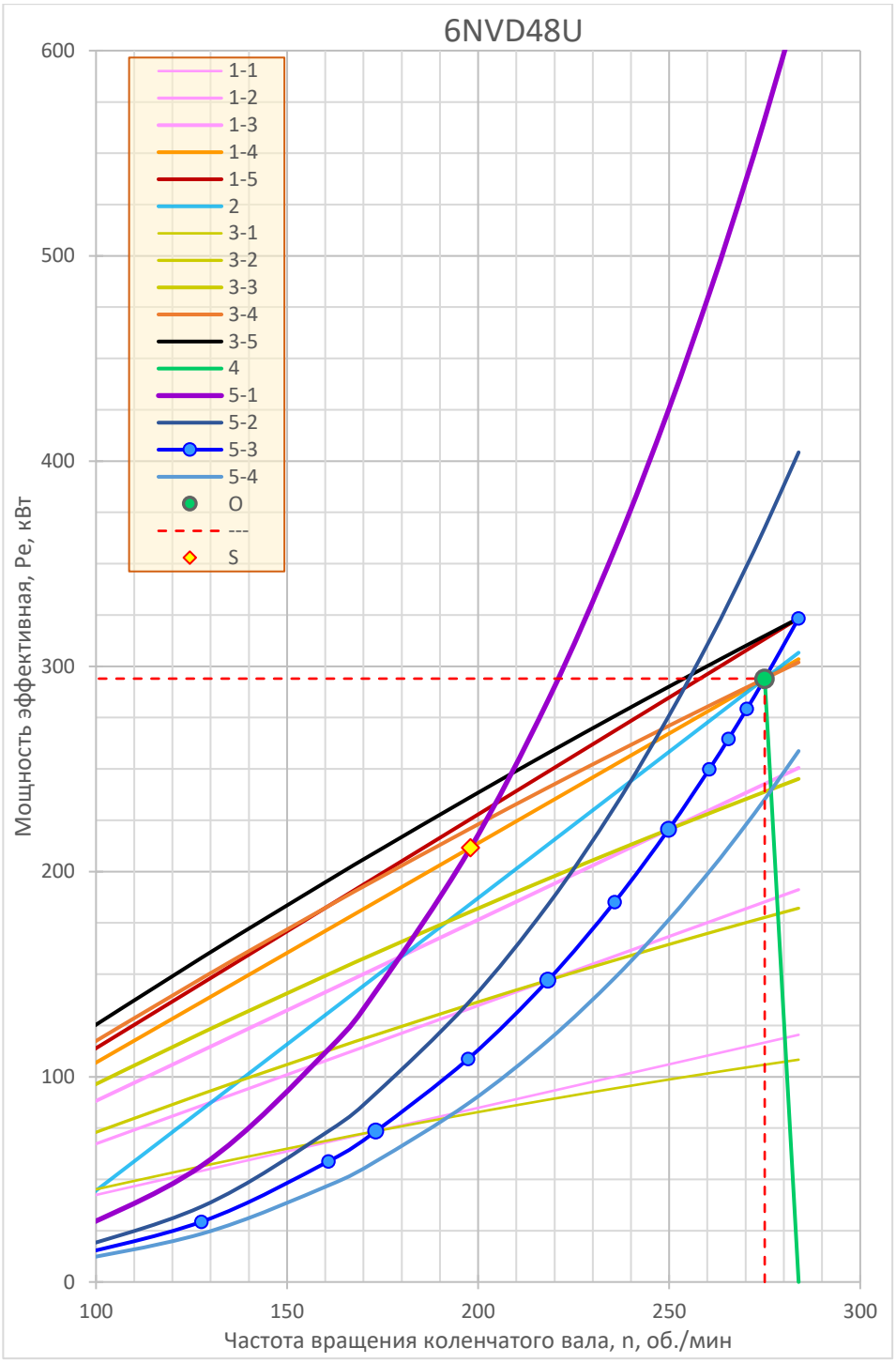


Рис. 4. Характеристики двигателя 6NVD48 на грузовом теплоходе проекта 576 с винтом в насадке (обозначение линий см. в таблице 4)

Таблица 4

Обозначение характеристик на рисунках 3, 4

Номер	Характеристика	Примечания
1	**Линии постоянного крутящего момента**	—
1-1	При мощности 25% номинальной	—
1-2	При мощности 50% номинальной	—
1-3	При мощности 75% номинальной	—
1-4	При номинальной мощности	Ограничительная по номинальному крутящему моменту
1-5	При мощности 110% номинальной	Ограничительная по максимальному крутящему моменту
2	**Ограничительная по коэффициенту избытка воздуха**	—
3	**Характеристики постоянной цикловой подачи топлива**	—
3-1	При мощности 25% номинальной	—
3-2	При мощности 50% номинальной	—
3-3	При мощности 75% номинальной	—
3-4	При номинальной мощности	Внешняя характеристика номинальной мощности
3-5	При мощности 110% номинальной	Внешняя характеристика максимальной мощности
4	**Регуляторная характеристика**	Номинальная
5	**Винтовые характеристики**	—
5-1	Швартовная характеристика	—
5-2	Тяжелая винтовая характеристика	Эксплуатационная
5-3	Номинальная винтовая характеристика	—
5-4	Лёгкая винтовая характеристика	0.85 $Pe_{ном}$
O	Точка номинального режима	—
S	Точка максимальной частоты вращения на швартовной характеристике	—

На рисунках 3 и 4 представлено все множество характеристик двигателя, в том числе ограничительные и винтовые характеристики, а также показана точка *S*, соответствующая предельной частоте вращения вала двигателя в швартовном режиме. Для пассажирского теплохода это значение составило 198 об/мин, для грузового – 238 об/мин. Сравнение швартовных характеристик судов двух проектов показывает более резкое возрастание мощности при работе по швартовной характеристике у пассажирского теплохода по сравнению с грузовым. Так как двигатели на означенных судах однотипные, а винты имеют близкие параметры, можно сказать, что влияние на протекание швартовных характеристик оказывает тип винта. Открытый винт пассажирского судна нагружает двигатель при работе по швартовной характеристике более интенсивно, чем винт в насадке грузового теплохода.

Аналогичным образом могут быть определены и частоты вращения на швартовной характеристике, соответствующие 75, 50 и 25% номинального крутящего

момента, что, например, требуется при проведении испытаний двигателя на соответствие нормам выбросов согласно ПТНП РКО [8]. Для рассматриваемых проектов судов эти значения приведены в таблице 5.

Таблица 5

Частота вращения коленчатого вала и мощность главных двигателей при работе по швартовной характеристике, соответствующие 100, 75, 50 и 25% номинального крутящего момента

Относительный крутящий момент	Теплоход проекта 588		Теплоход проекта 576	
	n, об./мин	P_e, кВт	n, об./мин	P_e, кВт
100%	198.1	211.7	238.2	262.7
75%	180.0	158.8	216.4	197.0
50%	157.2	105.9	189.0	131.4
25%	124.8	52.9	150.0	65.7

Оценить согласованность работы главных двигателей и гребных винтов по данным швартовных испытаний можно, сопоставив снятые, например, в ходе тензометрирования действительные швартовные характеристики с теоретической швартовной характеристикой. Если действительная швартовная характеристика проходит левее теоретической, это означает, что винт гидродинамически тяжелый, он и при номинальной частоте вращения будет нагружать двигатель больше. Напротив, расположение действительной швартовной характеристики правее теоретической свидетельствует, что винт является гидродинамически легким и подобран с соответствующим «морским запасом».

Выводы

1. Предложен способ построения швартовной характеристики, использующий заданные **параметры** двигателя и гребного винта.
2. Показана зависимость швартовной характеристики от коэффициента момента.
3. Определена точка, соответствующая предельной частоте вращения вала двигателя в швартовном режиме, а также точки, соответствующие 25, 50, 75 % крутящего момента при работе по винтовой характеристике.
4. Выполнена сравнительная оценка нагрузки двигателя при работе с открытым винтом пассажирского судна и винтом в направляющей насадке грузового судна.

Список литературы

1. Руководство по расчету и проектированию гребных винтов судов внутреннего плавания. Приложение. / Под ред. А.М. Басина, Е.И. Степанюка. – Л.: Транспорт, 1977. – 40 с.
2. Расчет движительного комплекса винтового судна. / А.Г. Ряйсянен. - Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2013. – 39 с. (https://togudv.ru/media/filer_public/2013/02/19/tus_my-kr.pdf) (дата обращения: 27.03.2026)
3. Кортунова Е.Л., Яковлева О.В. Оценка коэффициента попутного потока по результатам модельных испытаний водометного движителя. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 3 (385): 41–49.
4. Басин А.М. Ходкость и управляемость судов. – М.: Транспорт, 1977. – 455 с.
5. Справочник по теории корабля: В трех томах. Том 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители / Под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. – 768 с.
6. Руководство по теплотехническому контролю серийных теплоходов. – М.: Транспорт, 1980, 424 с.
7. Басин А.М., Миниович И.Я. Теория и расчет гребных винтов. Л.: Судпромгиз, 1963. – 759 с.
8. Российское Классификационное общество. Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов (ПТНП)

https://rfclass.ru/uploads/ptnp/ptnp_rko_vvedeny_v_dejstvie_s_13-12-2025.pdf (дата обращения: 12.04.2026)

References

1. Rukovodstvo po raschetu i proektirovaniyu grebnyh vintov sudov vnutrennego plavaniya. Prilozhenie. / Pod red. A.M. Basina, E.I. Stepanyuka. – L.: Transport, 1977. – 40 s.
2. Raschet dvizhitel'nogo kompleksa vintovogo sudna./ A.G. Ryajsyanen. - Habarovsk: Izd-vo TOGU, 2013. – 39 s. (https://togudv.ru/media/filer_public/2013/02/19/tus_my-kr.pdf) (data obrashcheniya: 27.03.2026)
3. Kortunova E.L., YAkovleva O.V. Ocenka koefficienta poputnogo potoka po rezul'tatam model'nyh ispytanij vodometnogo dvizhitelya. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra. 2018; 3 (385): 41–49.
4. Basin A.M. Hodkost' i upravlyaemost' sudov. – M.: Transport, 1977. – 455 s.
5. Spravochnik po teorii korablya: V trekh tomah. Tom 1. Gidromekhanika. Soprotivlenie dvizheniyu sudov. Sudovye dvizhiteli / Pod red. YA.I. Vojtkunskogo. – L.: Sudostroenie, 1985. – 768 s.
6. Rukovodstvo po teplotekhnicheskomu kontrolyu serijnyh teplohodov. – M.: Transport, 1980, 424 s.
7. Basin A.M., Miniovich I.YA. Teoriya i raschet grebnyh vintov L.:Sudpromgiz, 1963.–759 s.
8. Rossijskoe Klassifikacionnoe obshchestvo. Pravila tekhnicheskogo nablyudeniya za postrojkoj sudov i izgotovleniem materialov i izdelij dlya sudov (PTNP) https://rfclass.ru/uploads/ptnp/ptnp_rko_vvedeny_v_dejstvie_s_13-12-2025.pdf (data obrashcheniya: 12.04.2026)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Шураев Олег Петрович, к.т.н., доцент, доцент кафедры эксплуатации судовых энергетических установок, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, ауд. 667, e-mail: solwrk@inbox.ru

Oleg P. Shurayev, Candidate of Technical Science, Associate Professor, The Department «Operation of Ship Power Plants», Volga state university of water transport, 5, Nesterova str., Nizhny Novgorod, Russia

Самосюк Алина Игоревна, к.т.н., доцент кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности судов, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, ауд. 380, e-mail: aliandrsam@gmail.com

Alina I. Samosyuk, Candidate of Technical Science, The Department «Hydrodynamics, Ship Theory and Environmental Safety of Ships», Volga state university of water transport, 5, Nesterova str., Nizhny Novgorod, Russia

Статья поступила в редакцию 17.06.2026; принята к публикации 29.06.2026; опубликована онлайн 20.09.2026. Received 17.06.2026; published online 20.09.2026.

ЭКОНОМИКА, ЛОГИСТИКА И МЕНЕДЖМЕНТ НА ТРАНСПОРТЕ

ECONOMICS, LOGISTICS AND TRANSPORT MANAGEMENT

УДК 656.6: 378.4
DOI: 10.37890/jwt.vi87.732

Системная диагностика взаимодействия ВГУВТ и предприятий водного транспорта: выявление потерь и оптимизация контуров управления

С.Д. Гордлеев[1]
ORCID: 0000-0003-0053-0506
О.Л. Трухинова[1,2]
ORCID: 0000-0002-3423-9058
[1] *Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия*
[2] *Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Россия*

Аннотация. В статье предложена методика системной диагностики взаимодействия Волжского государственного университета водного транспорта (ВГУВТ) и отраслевых предприятий водного транспорта, позволяющая формализовать механизмы такого взаимодействия и идентифицировать области системных потерь. Теоретическую базу исследования составляет экосистемная типология систем Г.Б. Клейнера, позволяющая классифицировать виды деятельности вуза и предприятия как объектные, процессные, проектные и средовые системы и выявить конфликт конфигураций, порождающий системные потери взаимодействия и снижающий результативность кооперации. Предложены формулы параметрической оценки стоимости и потерь процессов, а также матричный и графический инструментарий для визуализации точек стыковки. Методика ориентирована на прикладное применение в рамках стратегических сессий университета с индустриальными партнёрами.

Ключевые слова: системная диагностика, взаимодействие «вуз–предприятие», типология систем, транзакционные издержки, контуры управления, параметрическая формализация, матрица потерь, транспортное образование, водный транспорт

System diagnostics of the interaction between VSUWT and water transport enterprises: identifying losses and optimizing management contours

Sergey D. Gordleev[1]
ORCID: 0000-0003-0053-0506
Olga L. Trukhinova[1,2]
ORCID: 0000-0002-3423-9058
[1] *Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*
[2] *Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia*

Abstract. The paper proposes a methodology for systemic diagnostics of the interaction between the Volga State University of Water Transport (VSUWT) and water transport industry enterprises, which allows formalising the mechanisms of such interaction and identifying areas of systemic losses. The theoretical framework of the study is the ecosystem

typology of systems by G.B. Kleiner, which makes it possible to classify the activities of a university and an enterprise as object, process, project and environment systems and to identify a configuration conflict that generates systemic losses of interaction and reduces the effectiveness of cooperation. Formulas for the parametric assessment of process costs and losses are proposed, as well as matrix and graphical tools for visualising points of complementarity. The methodology is oriented towards applied use within the framework of strategic sessions of the university with industrial partners.

Keywords: systemic diagnostics, university–industry interaction, system typology, transaction costs, management contours, parametric formalisation, loss matrix, transport education, water transport

Введение

Внутренний водный транспорт в структуре российской экономики традиционно занимает особое место, обеспечивая связность удалённых территорий и перемещение значительных объёмов грузов. Однако на современном этапе отрасль сталкивается с комплексом структурных проблем, среди которых можно выделить износ основных фондов, дефицит квалифицированных кадров и недостаточную интенсивность процессов технологической модернизации.

В условиях цифровой трансформации и кадрового дефицита на внутреннем водном транспорте качество взаимодействия одного из основных отраслевых университетов – Волжского государственного университета водного транспорта (далее – ВГУВТ) с предприятиями судостроения, судоходства и портовой инфраструктуры, становится критическим фактором развития отрасли. Недостаточно продуктивное взаимодействие профильного вуза с отраслевыми предприятиями вызывает разрыв в преемственности профессиональной подготовки, традиционно осуществляемой путем тесных взаимосвязей между производством, наукой и образованием.

Анализ научной литературы показывает, что проблема координации действий университетов и работодателей находится в фокусе внимания современных исследователей [1–5]. Однако, как справедливо отмечается в ряде работ, существующие формы сотрудничества (участие в ярмарках вакансий, разовые хоздоговорные НИР, привлечение представителей работодателей к государственной итоговой аттестации) носят преимущественно эпизодический характер и не позволяют в полной мере реализовать потенциал долгосрочного партнёрства [1, с. 100-111]. Такая модель, условно называемая «рыночной» или «контрактной», приводит к дублированию функций, увеличению числа согласований и, как следствие, к возникновению системных потерь, связанных с несогласованностью внутренних регламентов сторон.

Важно подчеркнуть, что эффективное управление процессами внутри вуза, включая образовательную и инновационную деятельность, является необходимым условием для построения продуктивных отношений с внешними партнёрами. Как справедливо отмечает Е.М. Кот в своём диссертационном исследовании, посвящённом управлению рисками в интегрированных структурах, синхронизация внутренних процессов организации с требованиями внешней среды позволяет минимизировать потери на стыках взаимодействия [6]. Особенно это актуально для такой специфической сферы, как водный транспорт, где возникают дополнительные системные риски из-за накопившихся проблем. Отдельные исследования акцентируют внимание на вопросах цифровой трансформации и устойчивого развития в судостроении [7; 8], а также на методологии системной оценки эффективности различных аспектов деятельности водного транспорта, включая использование цифровых технологий для обоснования решений [9; 10]. Решение

проблем многие исследователи видят в усилении взаимодействия отрасли и транспортного образования. Так, И.В. Маричев [11] рассматривает партнёрство как ключевой фактор развития морского образования, выделяя целевой контракт и поддержку баз для плавательной практики в качестве основных форм взаимодействия. G. Zhan с соавторами [4] на основе библиометрического анализа подтверждают устойчивый рост числа публикаций по тематике университетско-промышленного сотрудничества, а C. Nielsen и J.C. Sort [5] исследуют то, как ценность создаётся и обменивается на разных стадиях взаимодействия. Методологические вопросы оценки эффективности сотрудничества транспортных предприятий и вузов в рамках логистического кластера разрабатывают M. Kovbatiuk и V. Shevchuk [12], предлагая интегральный индекс для расчёта результативности.

Таким образом, проведённый анализ научной литературы позволяет констатировать следующее. Существующие исследования, безусловно, вносят существенный вклад в понимание проблем взаимодействия вузов и предприятий, а также в развитие методологии оценки эффективности на транспорте. Однако они, как правило, носят либо фрагментарный характер (затрагивая отдельные аспекты: правовые, экономические, организационные), либо ориентированы на конечные результаты (например, показатели коммерческой эффективности инвестиций), не фокусируясь на системных потерях, возникающих непосредственно в процессах взаимодействия на стыках управленческих контуров. Отсутствует комплексный инструментарий, позволяющий на ранних этапах диагностировать конфликт конфигураций между вузом и предприятием (как социально-экономических систем), выявлять зоны неэффективности и предлагать обоснованные направления оптимизации управленческих регламентов.

В связи с изложенным, цель настоящей работы заключается в разработке и обосновании методики системной диагностики взаимодействия ВГУВТ и предприятий водного транспорта, позволяющей формализовать механизмы такого взаимодействия, выявить зоны потенциальных потерь и предложить направления оптимизации контуров управления. Предлагаемая методика ориентирована на применение на этапе предпроектного анализа и не требует привлечения трудоёмких количественных оценок на начальном этапе.

В соответствии с поставленной целью в статье решаются следующие задачи:

1. Обосновать теоретико-методологические рамки исследования на основе синтеза типологии систем Г.Б. Клейнера и теории трансакционных издержек;
2. Разработать алгоритм системной диагностики, включающий этапы приоритизации видов деятельности, проверки комплементарности критичных блоков и параметрической формализации процессов;
3. Сформировать систему аналитических инструментов (матрица приоритетов, функция критичности, параметрическая модель затрат, матрица потерь), необходимых для реализации диагностики;
4. Предложить общую схему диагностики и условия завершения итерационного цикла.

Методы

В основу разрабатываемой методики положены две взаимодополняющие теоретические концепции, позволяющие комплексно анализировать взаимодействие сложных социально-экономических систем.

В соответствии с экосистемной типологией экономических систем Г.Б. Клейнера любая социально-экономическая система может быть охарактеризована через комбинацию четырёх идеальных типов систем: объектных (ограниченных в пространстве, но неограниченных во времени), процессных (характеризующихся устойчивой повторяемостью операций и алгоритмов), проектных (нацеленных на

уникальный результат в ограниченное время) и средовых (формирующих общий фон правил, норм и рамок взаимодействия) [13, с. 746; 14, с. 24-36]. Взаимодействие между разнотипными системами порождает так называемый «конфликт конфигураций», который может выражаться в несогласованности управленческих регламентов, временных горизонтов планирования и критериев оценки результативности. Следует отметить, что данный подход находит развитие в работах зарубежных авторов, в частности, в концепциях экосистемного управления предприятием [15].

В рамках данной работы этот теоретический подход используется для классификации видов деятельности ВГУВТ и предприятий водного транспорта. Предполагается, что вуз в своей основной деятельности тяготеет к проектной и средовой конфигурациям (научные исследования, разработка образовательных программ, формирование институциональной среды), в то время как предприятие ориентировано на объектно-процессную логику (эксплуатация флота, ремонт, производство). Рассогласование этих конфигураций является источником значительной части потерь при взаимодействии.

В теории трансакционных издержек Р. Коуза и О. Уильямсона под трансакционными издержками понимаются затраты на координацию, согласование, контроль и адаптацию, которые не связаны непосредственно с производством основного блага [16, с. 386-405; 17, с. 448]. Применительно к взаимодействию «вуз – предприятие» такими издержками выступают: время на подготовку и визирование договоров, избыточная внутренняя отчётность, согласительные совещания, адаптация документации под различные регламенты, затраты на поиск партнёров и ведение переговоров. Эти издержки, как правило, не отражаются в явной форме в бухгалтерской отчётности, но именно они составляют основу потерь, возникающих при несогласованности управленческих контуров.

Процедура системной диагностики. Разрабатываемая методика реализуется последовательно на трёх стадиях, каждая из которых имеет собственные аналитические инструменты и критерии перехода к следующей стадии. Методика носит итерационный характер: если на второй стадии не выявлено зон комплементарности, осуществляется возврат к первой стадии для пересмотра приоритетов или выбора другого блока деятельности.

Стадия 1. Ранжирование видов деятельности с системной классификацией. На первом шаге производится декомпозиция деятельности ВГУВТ и типового предприятия водного транспорта на крупные функциональные блоки. Каждому блоку присваивается тип системы по классификации Клейнера [13; 14; 18] и экспертным путём определяется ранг значимости (от 1 до 4) для данной стороны взаимодействия. Ранжирование осуществляется на основе анализа стратегических документов (Программы развития вуза, технологических стратегий отраслевых предприятий) и предварительных интервью с руководителями подразделений. Результатом стадии 1 является матрица приоритетов (Табл. 1), фиксирующая типологию деятельности сторон и гипотетические критические фазы — наиболее уязвимые звенья, где внутренние процессы наиболее нуждаются во внешней поддержке или, напротив, являются источником потерь при взаимодействии.

Таблица 1

Матрица приоритетов деятельности с типологией систем (по Г.Б. Клейнеру)

Блок деятельности	Тип системы (по Клейнеру)	Ранг для ВГУВТ	Ранг для предприятия	Гипотетическая критическая фаза
Образование /	Процессная (вуз) /	1	2	Старение ППС/

Блок деятельности	Тип системы (по Клейнеру)	Ранг для ВГУВТ	Ранг для предпри-ятия	Гипотетическая критическая фаза
подготовка кадров	Средовая (предприятие)			дефицит молодых специалистов
Наука / НИОКР	Проектная (вуз) / Проектная (предприятие)	2	3	Слабая коммерциализация/ недостаток прикладных инновационных разработок
Инфраструктура / оборудование	Объектная (вуз) / Объектная (предприятие)	3	4	Недозагрузка тренажёров/ дефицит доступной сертификации
Управление / финансы	Средовая (вуз) / Процессная (предприятие)	4	1	Избыточное количество согласований/ требование быстрого оформления заказов

Источник: составлено авторами.

Стадия 2. Выбор критичных блоков и проверка их комплементарности. Из матрицы приоритетов отбирается один-два блока с наивысшими рангами для обеих сторон. Для каждого блока вводится функция критичности $K_i(A)$ для вуза и $K_i(B)$ для предприятия. Значения функции определяются экспертным методом (например, с помощью опроса руководителей профильных подразделений по 5-балльной шкале). Условие существования зоны комплементарности (взаимодополняемости потребностей) записывается как:

$K_i(A) \geq \theta_A$ (функция критичности для блока i для вуза больше или равно некоторому значению θ_A для вуза)

$K_i(B) \geq \theta_B$ (аналогично для предприятия),

где θ_A, θ_B – пороговые значения, устанавливаемые для вуза и предприятия соответственно исходя из их стратегических приоритетов (в настоящем исследовании принято $\theta=4$ по 5-балльной шкале).

Если условие выполняется, диагностика переходит к третьей стадии. Если нет (пики критичности не совпадают) — осуществляется возврат к Стадии 1 для выбора другого блока либо уточнения гипотез о критических фазах.

Стадия 3. Параметрическая формализация и выделение предметов взаимодействия. На третьей стадии, после подтверждения наличия комплементарности, осуществляется детальный анализ выбранного блока. Для количественного описания процессов взаимодействия вводятся следующие параметрические характеристики для каждого процесса j:

$$Pj = \mathrm{T_j} + \mathrm{C_j} + \mathrm{M_j},$$
$$j = \overline{1,n}$$

где:

P_j — полная стоимость владения процессом (тыс. руб./цикл);

T_j — временные потери, исчисляемые через трудоёмкость операций t_{jk} (чел.-час) и среднюю часовую ставку w_{jk} (руб./час), рассчитанные по формуле $Tj=\sum t_{jk} \cdot w_{jk}$ (время, затраченное на k-ю операцию в рамках процесса j);

C_j — трансакционные издержки (издержки согласования, подготовка отчётов, контроль, совещания);

M_j — прямые материальные затраты.

Доля потерь L_j в процессе j определяется как:

$$Lj = \frac{Tj + Cj}{Pj}$$

Обобщённый показатель для блока:

$$\bar{L} = \frac{\sum_j (Tj + Cj)}{\sum_j Pj}$$

Кроме того, на данной стадии выделяются предметы взаимодействия — ключевые ресурсы, которые могут передаваться от одной взаимодействующей стороны к другой стороне или использоваться совместно.

Анализ отраслевой практики показывает, что такими предметами выступают:

1) люди (кадры),
2) технологии (результаты интеллектуальной деятельности),
3) НИОКР и научно-технические услуги,
4) коммуникация и симбиоз усилий.

Для каждого предмета строится матрица потерь (Табл. 2), позволяющая перейти от общих утверждений к конкретным зонам оптимизации.

Таблица 2

Матрица потерь по предметам взаимодействия

Предмет взаимодействия	Типичные потери со стороны вуза	Типичные потери со стороны предприятия
Кадры (практика, стажировки)	Рассогласование циклов (учебный год / навигация), трудности синхронизации графиков. Избыточный документооборот при оформлении практик	Дополнительная нагрузка наставников, недостаточная практическая подготовка студентов, требующая дообучения на месте.
Технологии	Долгий трансфер технологий из-за отсутствия стандартных лицензионных процедур, слабая патентная защита	Непонимание академического языка (терминологический барьер). Незавершённость результатов («демонстрационные образцы» вместо готового к внедрению продукта).
НИОКР, услуги	Отсутствие проектного управления, задержки сдачи работ. Высокие накладные расходы.	Непрозрачное ценообразование: стоимость работ часто включает дополнительные издержки вуза, при этом рыночные аналоги могут быть дешевле или прозрачнее. Отсутствие чёткой гарантии на результат.

Коммуникация (симбиоз)	Отсутствие единой цифровой среды, Неформализованные каналы связи (заявки через личные договорённости)	Потеря времени на многократное согласование позиций, неполное использование потенциала совместного лоббирования отраслевых решений

Источник: составлено авторами.

Общая схема диагностики и условия завершения. Предложенная методика носит итерационный характер: если на Стадии 2 комплементарность не обнаружена, осуществляется возврат к Стадии 1 для выбора другого блока либо уточнения гипотез о критических фазах. Завершение диагностики происходит при выполнении одновременно двух условий:

1) идентифицирована хотя бы одна зона комплементарности $Ki(A,B) \geq \theta$;

2) для этой зоны построена параметрическая модель и матрица потерь.

Блок-схема алгоритма диагностики представлена на рис. 1.



Рис. 1 Блок-схема системной диагностики взаимодействия «вуз – предприятие» (Составлено авторами)

Результаты

Разработанная методика системной диагностики позволяет структурировать проблемное поле взаимодействия ВГУВТ и отраслевых предприятий, выявить зоны потенциальных потерь и определить направления для оптимизации управленческих контуров. Ключевыми результатами применения методики являются:

1. *Матрица приоритетов*, фиксирующая типологию видов деятельности сторон и гипотетические критические фазы (Табл. 1). Этот инструмент позволяет перевести

разрозненные экспертные суждения о проблемах взаимодействия в структурированную форму, удобную для дальнейшего анализа.

2. *Функция критичности* $K_i(A,B)$ и условие комплементарности, которые превращают качественные экспертные оценки в формализуемый критерий для принятия решения о целесообразности углублённого анализа конкретного блока деятельности.

3. *Параметрическая модель* оценки затрат и потерь ($Pj = T_j + C_j + M_j$; $Lj = (Tj + Cj)/Pj$), которая позволяет количественно описать структуру издержек по выбранному процессу взаимодействия.

4. Матрица потерь по предметам взаимодействия (Табл. 2), систематизирующая типичные издержки для каждой из сторон при обмене ключевыми ресурсами (кадры, технологии, НИОКР, коммуникация). Матрица может быть использована как чек-лист при проведении диагностики и как основа для выработки рекомендаций по оптимизации.

Обсуждение

Предложенная методика органично вписывается в существующую парадигму системных исследований в экономике, развиваемую в работах Г.Б. Клейнера и его последователей [13; 14; 18; 19]. В отличие от известных разработок, где акцент делается преимущественно на анализе инвестиционных процессов или управлении качеством, предлагаемый подход фокусируется на процессной стороне взаимодействия и выявлении потерь, возникающих на стыках управленческих контуров.

Важной особенностью методики является её итерационный характер. Это означает, что диагностика не предполагает однократного «измерения» и последующей выработки рекомендаций, а допускает возможность многократного возврата к предыдущим этапам при обнаружении несопрягаемости потребностей сторон. Такой подход позволяет избежать ложных предположений и постепенно сужать зону поиска.

При этом следует подчеркнуть, что предлагаемая методика не претендует на полноту количественного анализа на начальном этапе. Введение параметрической модели служит, прежде всего, для иллюстрации логики дальнейшего анализа и задания направления для сбора данных на последующих этапах. Конкретные числовые значения временных и трансакционных издержек могут быть получены в ходе последующей апробации методики на основе реальных договоров, но это является предметом отдельного исследования.

Кроме того, следует отметить ограничения предлагаемого подхода. Во-первых, функция критичности $K_i(A,B)$ и пороговые значения θ_A, θ_B задаются экспертным путём, что предполагает наличие определённого уровня субъективности. Во-вторых, параметрическая модель не учитывает возможные синергетические эффекты, которые могут возникать при одновременной оптимизации нескольких процессов. В-третьих, предлагаемая матрица потерь является обобщённой и может потребовать адаптации применительно к конкретным видам деятельности или организационным структурам.

Несмотря на указанные ограничения, разработанная методика имеет несомненную практическую ценность. Она может быть использована при формировании стратегии развития взаимодействия с отраслевыми предприятиями, а также в качестве инструмента внутреннего аудита для других транспортных вузов. Дальнейшим направлением исследований является эмпирическая верификация предложенной методики на расширенной выборке договоров, а также создание цифрового инструментария для автоматизированного мониторинга временных и трансакционных издержек.

Заключение

В ходе настоящего исследования достигнуты следующие основные результаты.

1. Разработана методика системной диагностики взаимодействия отраслевого университета и предприятий водного транспорта, включающая этапы:

а) ранжирование видов деятельности с классификацией по типу систем Г.Б. Клейнера и построение матрицы приоритетов;

б) выбор критичных блоков и проверку их комплементарности на основе функции критичности и пороговых значений;

в) параметрическую формализацию процессов с введением показателей временных, трансакционных и материальных затрат, а также формирование матрицы потерь по предметам взаимодействия.

2. Предложена система аналитических инструментов, включающая матрицу приоритетов, функцию критичности, параметрическую модель затрат ($Pj = T_j + C_j + M_j$; $Lj = (Tj + Cj)/Pj$), а также матрицу потерь по четырём базовым предметам взаимодействия (кадры, технологии, НИОКР, коммуникация).

3. Разработана общая схема диагностики, имеющая итерационный характер и включающая условие завершения: идентификация хотя бы одной зоны комплементарности $(K_i(A,B) \geq \theta)$ и построение для этой зоны параметрической модели и матрицы потерь.

4. Сформулированы направления дальнейших исследований: эмпирическая верификация методики на основе анализа договоров ВГУВТ; разработка и пилотное внедрение цифрового трекера заказов; сравнительный анализ эффективности различных моделей проектных офисов при университетах.

Полученные результаты могут быть использованы ВГУВТ при создании программы развития взаимодействия с отраслевыми предприятиями, а также могут быть тиражированы на другие транспортные вузы.

Список литературы

1. Милёхина О.В., Асланова И.В., Сирик Е.Е. Координация действий университетов и бизнеса: разработка датацентричного инструмента взаимодействия // Университетское управление: практика и анализ. – 2024. – Т. 28. – № 2. – С. 99-112. – DOI: 10.15826/umj.2024.02.007.
2. Терехова-Пушная Д.В. Опыт построения системных отношений «ВУЗ-предприятие» // Современные проблемы науки и образования. – 2020. – № 5. – С. 22.
3. Etzkowitz H., Leydesdorff L. The Triple Helix — University-Industry-Government Relations: A Laboratory for Knowledge-Based Economic Development // EASST Review. – 1995. – Vol. 14. – No. 1. – P. 14-19.
4. Zhan G., Rasul M.S., Omar M. A Bibliometric Analysis of Publications on University-Industry Collaboration Using VOSviewer and R-biblioshiny // Multidisciplinary Journal for Education, Social and Technological Sciences. – 2024. – Vol. 11. – No. 2. – P. 26-50. – DOI: 10.4995/muse.2024.21988.
5. Nielsen C., Sort J.C. How is Value Created and Exchanged in Different Stages and Different Types of University-Industry Collaborations? // Proceedings of the 4th European Conference on Intellectual Capital. – 2012. – P. 263-272.
6. Кот Е.М. Управление рисками в интегрированных структурах АПК: диссертация ... доктора экономических наук: 08.00.05 / Кот Екатерина Михайловна; [Место защиты: Уральский государственный аграрный университет]. – Екатеринбург, 2022. – 352 с.
7. Шепелин Г.И. Оценка и развитие хозяйствующих субъектов водного транспорта в условиях цифровой трансформации // π-Economy. – 2024. – Т. 17. – № 4. – С. 25-52. – URL: https://elib.spbstu.ru/dl/2/j24-254.pdf (дата обращения: 15.06.2026).
8. Щепетова С.Е., Щербин К.И., Трухинова О.Л. Обеспечение устойчивого развития судостроительных предприятий на основе интеллектуальных систем управления // Научные проблемы водного транспорта. – 2025. – № 82(1). – С. 182-195. – DOI: 10.37890/jwt.vi82.581.

9. Трухинова О.Л. Формирование системной оценки удовлетворенности потребителей в процессе инвестиционного выбора круизного судна // Научные проблемы водного транспорта. – 2020. – № 61. – С. 153-163. – URL: http://journal.vsuwt.ru/index.php/jwt/article/view/30.
10. Trukhinova O. New Approaches to Substantiating Investment Choices in Water Transport Using Digital Technologies // Springer, 2022. – DOI: 10.1007/978-3-030-96383-5_72. – URL: https://trid.trb.org/view/1978955.
11. Маричев И.В. Партнёрство как фактор развития морского образования // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. – 2017. – № 2. – С. 43-49. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/partnyorstvo-kak-faktor-razvitiya-morskogo-obrazovaniya (дата обращения: 15.06.2026).
12. Kovbatiuk M., Shevchuk V. Efficiency Evaluation of Cooperation between Transport Enterprises and Higher Education Institutions in the Transport and Logistics Cluster // Economics of Development. – 2018. – Vol. 17. – No. 3. – P. 25-34.
13. Клейнер Г.Б. Системная экономика: шаги развития: Монография / Г.Б. Клейнер. Предисловие академика В.Л. Макарова. – М.: Издательский дом «НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА», 2021. – 746 с.
14. Клейнер Г.Б. Системный менеджмент и системная оптимизация предприятия // Современная конкуренция. – 2018. – № 1 (67). – С. 24-36.
15. Yerznkyan B.H. Enterprises and Ecosystems: Features' Relational Analysis // Journal of Economic Regulation. – 2020. – Vol. 11. – No. 4. – P. 6-19. – DOI: 10.17835/2078-5429.2020.11.4.006-019.
16. Coase R.H. The Nature of the Firm // Economica. – 1937. – Vol. 4. – No. 16. – P. 386-405.
17. Williamson O.E. The Mechanisms of Governance. – New York: Oxford University Press, 1996. – 448 p.
18. Kleiner G.B., Karpinskaya V.A. Transition of Firms from the Traditional to Ecosystem Form of Business: The Factor of Transaction Costs // Economics of Contemporary Russia. – 2020. – No. 2. – P. 7-20.
19. Щепетова С.Е. Критические этапы комплексного моделирования социально-экономических систем в целях прогнозирования // π-Economy. – 2025. – Т. 18. № 6. – С. 177-203.

References

1. Milehina O.V., Aslanova I.V., Sirik E.E. Koordinacija dejstvij universitetov i biznesa: razrabotka datacentrichnogo instrumenta vzaimodejstvija // Universitetskoe upravlenie: praktika i analiz. – 2024. – T. 28. – № 2. – S. 99-112. – DOI: 10.15826/umj.2024.02.007.
2. Terehova-Pushnaja D.V. Opyt postroenija sistemnyh otnoshenij «VUZ-predprijatie» // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. – 2020. – № 5. – P. 22.
3. Etzkowitz H., Leydesdorff L. The Triple Helix — University-Industry-Government Relations: A Laboratory for Knowledge-Based Economic Development // EASST Review. – 1995. – Vol. 14. – No. 1. – P. 14-19.
4. Zhan G., Rasul M.S., Omar M. A Bibliometric Analysis of Publications on University-Industry Collaboration Using VOSviewer and R-biblioshiny // Multidisciplinary Journal for Education, Social and Technological Sciences. – 2024. – Vol. 11. – No. 2. – P. 26-50. – DOI: 10.4995/muse.2024.21988.
5. Nielsen C., Sort J.C. How is Value Created and Exchanged in Different Stages and Different Types of University-Industry Collaborations? // Proceedings of the 4th European Conference on Intellectual Capital. – 2012. – P. 263-272.
6. Kot E.M. Upravlenie riskami v integrirovannyh strukturah APK: dissertacija ... doktora jekonomicheskih nauk: 08.00.05 / Kot Ekaterina Mihajlovna; [Mesto zashhity: Ural'skij gosudarstvennyj agrarnyj universitet]. – Ekaterinburg, 2022. – 352 pp.
7. Shepelin G.I. Ocenka i razvitie hozjajstvujushhih sub#ektov vodnogo transporta v uslovijah cifrovoj transformacii // π-Economy. – 2024. – T. 17. – № 4. – S. 25-52. – URL: https://elib.spbstu.ru/dl/2/j24-254.pdf (data obrashhenija: 15.06.2026).
8. Shchepetova S.E., Shcherbin K.I., Trukhinova O.L. Obespechenie ustojchivogo razvitija sudostroitel'nyh predprijatij na osnove intellektual'nyh sistem upravlenija // Nauchnye

problemy vodnogo transporta. – 2025. – № 82(1). – S. 182-195. – DOI: 10.37890/jwt.vi82.581.
9. Trukhinova O.L. Formirovanie sistemnoj ocenki udovletvorennosti potrebitelej v processe investicionnogo vybora kruiznogo sudna // Nauchnye problemy vodnogo transporta. – 2020. – № 61. – S. 153-163. – URL: http://journal.vsuwt.ru/index.php/jwt/article/view/30.
10. Trukhinova O. New Approaches to Substantiating Investment Choices in Water Transport Using Digital Technologies // Springer, 2022. – DOI: 10.1007/978-3-030-96383-5_72. – URL: https://trid.trb.org/view/1978955.
11. Marichev I.V. Partnjorstvo kak faktor razvitija morskogo obrazovanija // Nauchno-tehnicheskij vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoj aviacii. – 2017. – № 2. – S. 43-49. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/partnyorstvo-kak-faktor-razvitiya-morskogo-obrazovaniya (data obrashhenija: 15.06.2026).
12. Kovbatiuk M., Shevchuk V. Efficiency Evaluation of Cooperation between Transport Enterprises and Higher Education Institutions in the Transport and Logistics Cluster // Economics of Development. – 2018. – Vol. 17. – No. 3. – P. 25-34.
13. Klejner G.B. Sistemnaja jekonomika: shagi razvitija: Monografija / G.B. Klejner. Predislovie akademika V.L. Makarova. – M.: Izdatel'skij dom «NAUChNAJa BIBLIOTEKA», 2021. – 746 s.
14. Klejner G.B. Sistemnyj menedzhment i sistemnaja optimizacija predprijatija // Sovremennaja konkurencija. – 2018. – № 1 (67). – S. 24-36.
15. Yerznkyan B.H. Enterprises and Ecosystems: Features' Relational Analysis // Journal of Economic Regulation. – 2020. – Vol. 11. – No. 4. – P. 6-19. – DOI: 10.17835/2078-5429.2020.11.4.006-019.
16. Coase R.H. The Nature of the Firm // Economica. – 1937. – Vol. 4. – No. 16. – P. 386-405.
17. Williamson O.E. The Mechanisms of Governance. – New York: Oxford University Press, 1996. – 448 p.
18. Kleiner G.B., Karpinskaya V.A. Transition of Firms from the Traditional to Ecosystem Form of Business: The Factor of Transaction Costs // Economics of Contemporary Russia. – 2020. – No. 2. – P. 7-20.
19. Shchepetova S.E. Kriticheskiye etapy kompleksnogo modelirovaniya sotsialno-ekonomicheskikh sistem v tselyakh prognozirovaniya // π-Economy. – 2025. – Vol. 18. № 6. – P. 177-203.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Гордлеев Сергей Дмитриевич, Начальник УННИД, Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: gordleev@vsawt.com

Sergey D. Gordleev, Head of UNNID, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951, e-mail: gordleev@vsawt.com

Трухинова Ольга Леонидовна, к.э.н., доцент кафедры Бухгалтерского учета, анализа и финансов, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5; старший преподаватель кафедры Моделирования и системного анализа Факультета информационных технологий и анализа данных, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (ФГОБУ ВО «Финансовый университет при Правительстве РФ»), 125993 (ГСП-3), г. Москва, Ленинградский просп., 49, e-mail: truhinova@mail.ru

Olga L. Trukhinova, PhD in Economics, Associate Professor of the Department of Accounting, Analysis and Finance Volga State University of Water Transport (VSUWT), 5, Nesterova street, Nizhny Novgorod, Russia, 603951; Senior Lecturer at the Department of Modeling and Systems Analysis, Faculty of Information Technology and Data Analysis, Financial University under the Government of the Russian Federation, 49, Leningradsky prospect, Moscow, Russia, 125993, e-mail: truhinova@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18.06.2026; принята к публикации 10.08.2026; опубликована онлайн 20.09.2026. Received 18.06.2026; published online 20.09.2026.

УДК 656.615:656.073
DOI: 10.37890/jwt.vi87.739

Порт-хаб в транспортной системе юга Приморского края

Р.В. Гулидов
ORCID: 0000-0002-1542-4901
М.В. Холоша
ORCID: 0000-0002-7528-4349
А.Н. Гаврилов
ORCID: 0009-0003-4679-0933
Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, г. Владивосток, Россия

Аннотация. Предметом исследования является транспортно-логистическая система юга Приморского края, обеспечивающая взаимодействие морских портов, железнодорожных и автомобильных подходов, а также пунктов пропуска на границе с КНР и КНДР. Цель статьи состоит в оценке влияния нового порта-хаба на перераспределение грузопотоков, загрузку объектов и наличие узких мест в рассматриваемой системе. Методическую основу исследования составило сценарное моделирование с использованием цифровой модели южной части транспортно-логистической системы Приморья, реализованной на базе транспортно-экономического баланса. Сопоставлены два сценария развития до 2035 г.: инерционный и сценарий с созданием порта-хаба и сопряженной транспортной и приграничной инфраструктуры. Результаты расчетов показали, что в инерционном сценарии сохраняется перегрузка ряда ключевых объектов, включая ЖДПП Махалино, порты Владивосток и Зарубино, терминал Славянка и железнодорожный участок 207 км – государственная граница с КНР. Во втором сценарии нагрузка на основные лимитирующие элементы снижается, а грузопотоки перераспределяются между объектами сети. Сделан вывод, что системный эффект дает не изолированное строительство нового порта, а формирование интегрированного транспортно-логистического узла. Полученные результаты могут использоваться при обосновании инфраструктурных решений на юге Приморского края.

Ключевые слова: порт-хаб, транспортно-логистическая система, юг Приморского края, грузопотоки, сценарное моделирование, узкие места, пропускная способность, международный транзит, транспортная инфраструктура

Port-hub in the transport system of the south of Primorsky Krai

Ruslan V. Gulidov
ORCID: 0000-0002-1542-4901
Mikhail V. Holosha
ORCID: 0000-0002-7528-4349
Alexander N. Gavrilov
ORCID: 0009-0003-4679-0933
Admiral Nevelskoy Maritime State University, Vladivostok, Russian Federation

Abstract. The study focuses on the transport and logistics system of southern Primorsky Krai, which integrates seaports, railway and road approaches, and border checkpoints with China and North Korea. The purpose of the paper is to assess how the formation of a port hub may affect cargo flow redistribution, infrastructure utilization, and bottlenecks within this system. The methodological framework is based on scenario modeling using a digital model of the southern part of Primorye's transport and logistics system developed on the

basis of the transport-economic balance approach. Two scenarios through 2035 are compared: a business-as-usual scenario and a scenario involving the creation of a port hub together with related transport and border infrastructure. The results show that under the business-as-usual scenario, several key facilities remain overloaded, including the Makhalino railway border crossing, the Ports of Vladivostok and Zarubino, the Slavyanka terminal and the railway section between the 207 km point and the Chinese border. Under the port-hub scenario, the load on the main limiting facilities decreases, while cargo flows are redistributed across the network. The paper concludes that the systemic effect is achieved not by constructing an isolated port facility, but by forming an integrated transport and logistics hub. The findings may be used to support infrastructure planning in southern Primorsky Krai.

Keywords: port hub, transport and logistics system, southern Primorsky Krai, cargo flows, scenario modeling, bottlenecks, throughput capacity, international transit, transport infrastructure.

Введение

Изменение географии внешней торговли России в последние годы существенно повысило значение восточного направления и транспортной системы юга Дальнего Востока. В этих условиях юг Приморского края приобретает особое значение как зона сопряжения морской, железнодорожной, автомобильной и приграничной инфраструктуры. Вместе с тем рост нагрузки на данный участок выявил не только дефицит отдельных мощностей, но и более общую проблему несогласованности развития инфраструктурных элементов, от которой зависит пропуск экспортно-импортных, внутренних и транзитных грузопотоков.

На протяжении длительного времени решение этой задачи связывалось с развитием международных транспортных коридоров «Приморье-1» и «Приморье-2». Однако наличие выгодного географического положения и потенциальной грузовой базы само по себе не обеспечило формирования устойчивой системы сквозных мультимодальных перевозок. Ограничениями остаются пропускная способность железнодорожных и автомобильных подходов, параметры пунктов пропуска, согласованность работы разных видов транспорта и недостаточная развитость сопутствующих логистических сервисов [1–4]. В результате юг Приморья пока не выполняет в полной мере функции узла перераспределения грузопотоков, а транспортная система работает с высокой чувствительностью к локальным перегрузкам отдельных объектов.

В этих условиях практический интерес представляет сценарий строительства на юге Приморья порта-хаба, способного принять на себя часть функций перераспределения грузов и изменить схему работы транспортной сети. Однако значение имеет не сам по себе новый портовый объект, а его включение в более широкий транспортно-логистический контур, охватывающий железнодорожные подходы, автомобильные связи, пункты пропуска и внутрипортовую инфраструктуру. Поэтому оценка такого сценария требует рассмотрения юга Приморья как единой транспортно-логистической системы, в которой изменение одного элемента влияет на загрузку и устойчивость всей сети.

Цель статьи заключается в оценке влияния порта-хаба на перераспределение грузопотоков и параметры функционирования транспортно-логистической системы юга Приморского края. Для достижения этой цели в работе используется цифровая модель рассматриваемого участка сети, реализованная на базе транспортно-экономического баланса, и сопоставляются два сценария развития до 2035 г. – инерционный и сценарий с созданием порта-хаба и сопряжённой инфраструктуры. Это позволяет выявить ключевые узкие места системы, определить характер изменения нагрузки на отдельные объекты и оценить условия, при которых появление нового узла может дать системный эффект для работы транспортной сети.

Материалы и методы

Объектом исследования является южная часть транспортно-логистической системы Приморского края, в пределах которой функционируют морские порты и терминалы, железнодорожные подходы, автомобильные дороги и пункты пропуска на границе с КНР и КНДР. Выбор этого участка обусловлен его положением на стыке морских, сухопутных и приграничных маршрутов, а также возможностью оценки влияния нового портового узла на распределение грузопотоков внутри рассматриваемой транспортной системы.

Методическую основу исследования составило сценарное моделирование функционирования транспортной системы на базе цифровой модели, реализованной в геоинформационном программно-вычислительном комплексе RITM3.[7] В качестве расчетной схемы использован подход транспортно-экономического баланса, позволяющий моделировать прохождение грузопотоков через сеть инфраструктурных объектов с учетом их провозной и пропускной способности, взаимного расположения и заданных маршрутов следования [5].

Географически модель охватывает территорию, ограниченную с севера районом Уссурийска, с востока – узлом Угловая–Артем, с запада – пунктами пропуска на российско-китайской границе, а с юга – портами Владивосток, Зарубино и Посьет, терминалом Славянка, а также выходами к границе КНДР (рис. 1). Все элементы системы разделены на две группы: линейные и точечные. К линейным отнесены участки железных и автомобильных дорог, к точечным – порты, терминалы, железнодорожные станции, пункты пропуска и узлы ветвления маршрутов.

Для каждого объекта в модели задавались параметры провозной или пропускной способности, а для грузопотоков – начальные и конечные пункты маршрута, вид транспорта, номенклатура груза и объем перевозки. В расчетах использовалось укрупнение по четырем группам грузов: наливные, навалочные, контейнерные и прочие. На основе этих данных формировалась матрица корреспонденций, после чего для каждого элемента сети определялись суммарный грузопоток и относительная нагрузка, рассчитываемая как отношение объема перевозок к провозной или пропускной способности объекта. Этот показатель использовался для выявления узких мест и сравнения сценариев.

Отладка модели выполнялась на данных 2024 г.[8] Далее были сформированы два сценария развития транспортной системы до 2035 г. Первый сценарий является инерционным и предполагает сохранение существующей логики организации перевозок при реализации уже намеченных инфраструктурных решений. Второй сценарий предусматривает создание порта-хаба на юге Приморья и развитие сопряженной инфраструктуры.

Для обоих сценариев общий расчетный грузопоток был разделен на инерционный и проектный сегменты. К инерционному сегменту отнесены российские внешнеторговые перевозки, каботаж и местные грузопотоки, а также международный транзит по уже функционирующим направлениям. К проектному сегменту отнесены дополнительные потоки, появление которых связано с развитием хабовой функции и более активным освоением международного транзита. При оценке проектного

[7] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018661616 Российская Федерация. RITM3: № 2018619122: заявл. 27.08.2018: опубл. 10.09.2018 / А.В. Прохоров, Д.С. Асатрян, И.И. Яицкий и др.; заявитель ООО «А+С Транспроект».

[8] Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025670017 Российская Федерация. «База данных имитационной модели Хасанского транспортного узла (Приморский край)»: заявл. 25.03.2025: опубл. 03.04.2025; заявитель ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г.И. Невельского».

сегмента использован подход, основанный на разделении потенциальной грузовой базы и той ее части, которая может быть реально привлечена при заданных инфраструктурных и организационных условиях [6].



Рис. 1. Схема моделируемого участка транспортно-логистической системы юга Приморья

Такое построение расчетной схемы позволяет отделить эффект общего роста перевозок от эффекта, возникающего вследствие изменения организации транспортной системы. Поэтому сравнение сценариев проводится по изменению загрузки конкретных объектов, наличию резервов пропускной способности и

возможности перераспределения грузопотоков внутри моделируемой сети. Параметры, определяющие различия между вариантами развития представлены в таблице 1.

Таблица 1

Основные различия расчетных сценариев

Параметр	Сценарий 1	Сценарий 2
Организация перевозок	инерционная схема	схема с портом-хабом
Освоение проектного международного транзита	15% потенциала	60% потенциала
Трансшипмент	отсутствует	до 5 млн т в год
Порт-хаб в Славянском заливе	отсутствует	предусматривается
ЖДПП Махалино	8 млн т в год	100 млн т в год
Второй железнодорожный путь к хабу	отсутствует	предусматривается

Источник: составлено авторами по результатам сценарного моделирования.

Результаты

Сценарное моделирование показало существенные различия в работе транспортно-логистической системы юга Приморья при инерционном развитии и при формировании порта-хаба. Освоение проектного сегмента грузовой базы в первом варианте остается ограниченным: международный транзит по МТК «Приморье-1» и «Приморье-2» принимается на уровне 15% от оцененного потенциала, трансшипмент отсутствует. Во втором сценарии предусматривается формирование порта-хаба в Славянском заливе, развитие ЖДПП Махалино, строительство второго железнодорожного пути от границы с КНР к порту-хабу и более согласованное распределение потоков между автомобильными и железнодорожными направлениями. При этом хаб рассматривается как объект, способный к 2035 г. обрабатывать до 60 млн т транзитных грузов в рамках принятой сценарной оценки.

Результаты расчетов показывают, что в инерционном сценарии транспортная система не обеспечивает пропуск всего расчетного грузопотока даже при ограниченном освоении международного транзита. Наиболее напряженными элементами становятся ЖДПП Махалино, порт Зарубино, терминал Славянка, порт Владивосток, а также железнодорожный участок 207 км – государственная граница с КНР. По этим объектам расчетная относительная нагрузка превышает 100%, что указывает на невозможность пропуска всего заданного объема перевозок в пределах имеющихся провозных и пропускных способностей (табл. 2).

Во втором сценарии ситуация меняется. Развитие сопряженной железнодорожной и приграничной инфраструктуры позволяет снять основные ограничения на направлении к предполагаемому порту-хабу. Относительная нагрузка на ЖДПП Махалино снижается со 159 до 69%, на участке 207 км – государственная граница с КНР – со 113 до 55%, на терминале Славянка – со 183 до 83%, на порту Зарубино – со 135 до 85%. Даже на объектах, где нагрузка остается высокой, она не превышает критического уровня. Это означает, что сценарий с портом-хабом меняет не только распределение отдельных грузопотоков, но и общую работоспособность рассматриваемого участка транспортной системы.

Таблица 2

Расчетная нагрузка ключевых объектов транспортной инфраструктуры юга Приморского края в 2035 году, %

Объект транспортной инфраструктуры	Относительная нагрузка	
	Сценарий 1	Сценарий 2
Точечные объекты		
ЖДПП Махалино	159	69
ЖДПП Пограничный (ст. Гродеково)	99	83
АПП Краскино	19	82
АПП Пограничный	62	89
Порт Зарубино	135	85
Терминал Славянка	183	83
Порт Владивосток	106	92
Линейные железнодорожные объекты		
207 км - госграница с КНР	113	55
Уссурийск – Барановский	98	93

Источник: составлено авторами по результатам сценарного моделирования.

Сравнение сценариев показывает, что ключевым эффектом второго варианта является перевод системы из режима локальных перегрузок в режим более сбалансированного распределения нагрузки. При этом рост нагрузки на автомобильные пункты пропуска Краскино и Пограничный во втором сценарии не является отрицательным результатом: он отражает более активное использование сухопутных каналов при сохранении их загрузки в пределах расчетной пропускной способности. Таким образом, формирование порта-хаба при условии развития сопряженной инфраструктуры создает дополнительный канал пропуска грузов и снижает зависимость работы всей системы от нескольких перегруженных объектов.

Обсуждение

Полученные результаты показывают, что эффект формирования порта-хаба связан не столько с появлением нового портового объекта, сколько с изменением организации всей транспортно-логистической системы юга Приморья. В инерционном сценарии даже ограниченное освоение дополнительной грузовой базы приводит к перегрузке ряда точечных и линейных объектов. Это означает, что дальнейший рост транзитных и внешнеторговых перевозок не может быть обеспечен только за счет локальной модернизации отдельных терминалов или пунктов пропуска. Ограничения возникают на стыке разных элементов сети, поэтому их устранение требует согласованного развития портовой, железнодорожной, автомобильной и приграничной инфраструктуры.

Во втором сценарии именно такое согласованное развитие позволяет изменить режим работы системы. Строительство порта-хаба, развитие железнодорожного пункта пропуска Махалино и создание дополнительных железнодорожных мощностей на направлении к новому транспортному узлу приводят к снижению нагрузки на наиболее проблемные объекты. При этом рост загрузки отдельных автомобильных пунктов пропуска отражает более активное использование ранее недозагруженных элементов системы. Следовательно, результатом сценария с портом-хабом становится не простое увеличение суммарной мощности, а перераспределение потоков между элементами сети.

Такой результат согласуется с представлениями о порте-хабе как об элементе более широкой транспортно-логистической системы. В современной практике

конкурентоспособность портового узла определяется не только глубинами, причальными мощностями и объемами перегрузки, но и качеством его связей с наземной инфраструктурой, распределительными центрами, пунктами пропуска и сервисными операторами [7, 10, 11]. Поэтому применительно к югу Приморья речь должна идти о формировании мультимодального транспортного узла, обеспечивающего переключение грузопотоков между морским, железнодорожным и автомобильным транспортом.

При этом результаты моделирования не предполагают, что юг Приморья может быть сразу включен в число крупнейших глобальных контейнерных хабов. Более реалистичной является модель хаба регионального уровня, способного обслуживать часть транзитных и морских грузопотоков в системе Северо-Восточной Азии. Такая постановка соответствует исследованиям портов-хабов второго уровня, которые рассматриваются как промежуточные узлы между крупнейшими мировыми портами и фидерными направлениями [8, 9], а также работам, рассматривающим изменения системы морских связей в Северо-Восточной Азии [12]. Для юга Приморья это означает возможность не замещения крупнейших портов АТР, а занятия самостоятельной роли в региональной системе перевозок.

Отдельно следует подчеркнуть ограничения выполненного исследования. Во-первых, доли освоения проектного грузопотока в сценариях являются расчетными допущениями и отражают разные варианты инфраструктурной и организационной готовности системы. Во-вторых, модель учитывает провозную и пропускную способность объектов, но не формализует в полном объеме тарифные, институциональные и коммерческие факторы выбора маршрута. В-третьих, результаты относятся к заданной расчетной схеме и горизонту 2035 г. – изменение внешнеторговой конъюнктуры, тарифов морских линий или инвестиционных планов операторов может потребовать корректировки параметров сценариев.

Тем не менее полученные результаты позволяют сделать важный прикладной вывод: для развития транспортной системы юга Приморья критично не только наращивание отдельных мощностей, но и формирование согласованного транспортно-логистического контура. Порт-хаб может дать системный эффект лишь при одновременном развитии железнодорожных подходов, пунктов пропуска, портовых терминалов и организационных механизмов распределения грузопотоков. В противном случае новый портовый объект рискует стать еще одним элементом перегруженной сети, а не инструментом ее разгрузки и функционального усиления.

Заключение

Выполненное сценарное моделирование позволило оценить влияние формирования порта-хаба на работу транспортно-логистической системы юга Приморского края. Полученные результаты показывают, что в инерционном сценарии к 2035 г. сохраняется ряд критических ограничений, связанных с перегрузкой отдельных портовых, железнодорожных и приграничных объектов. Наиболее напряженными элементами становятся ЖДПП Махалино, порты Владивосток и Зарубино, терминал Славянка и железнодорожный участок 207 км – государственная граница с КНР. Это указывает на то, что дальнейшее освоение транзитных и внешнеторговых грузопотоков не может быть обеспечено только за счет текущей логики развития инфраструктуры.

Сценарий с формированием порта-хаба и сопряженной инфраструктуры демонстрирует иной режим работы системы. Развитие портового узла, железнодорожных подходов и приграничной инфраструктуры позволяет снизить нагрузку на ключевые лимитирующие объекты и перераспределить потоки между элементами сети. В результате транспортная система получает дополнительные

возможности для пропуска проектной грузовой базы без превышения расчетной провозной и пропускной способности наиболее важных объектов.

Основной вывод исследования состоит в том, что системный эффект дает не изолированное строительство нового портового объекта, а согласованное развитие порта-хаба и связанных с ним элементов транспортно-логистической системы юга Приморского края, в том числе железнодорожных и автомобильных подходов, пунктов пропуска, терминальной инфраструктуры и организационных механизмов распределения грузопотоков. При таком условии порт-хаб может выполнять функцию перераспределения потоков и снижать нагрузку на существующие элементы транспортной сети.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их использования при обосновании инфраструктурных решений по развитию юга Приморского края, в том числе при планировании портовых мощностей, железнодорожных подходов и развития пунктов пропуска. Предложенная расчетная схема может применяться для последующей детализации сценариев, уточнения параметров грузовой базы и оценки альтернативных вариантов развития транспортной системы региона.

Список литературы

1. Бардаль А.Б. Транспортный комплекс Дальнего Востока: национальные и локальные задачи // Регионалистика. 2021. Т. 8. № 6. С. 53–67. DOI: https://doi.org/10.14530/reg.2021.6.53.
2. Сидорюк А.В., Красова Е.В. Роль международных транспортных коридоров в экономике Приморского края // Азимут научных исследований: экономика и управление. 2019. Т. 8. № 1 (26). С. 311–314.
3. Павленко В.В. Оценка транзитного потенциала международных транспортных коридоров «Приморье-1» и «Приморье-2» // Таможенная политика России на Дальнем Востоке. 2017. № 1 (78). С. 55–63.
4. Лазарев Г.И., Кривелевич М.Е. Интеграция транспортных пространств России и АТР на примере Приморского края // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 419–427.
5. Евсеев О.В., Мурашов В.В., Забоев А.И. Транспортно-экономический баланс и его роль в согласовании транспортного планирования в условиях цифровой трансформации // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2018. Т. 14. № 3. С. 717–726. DOI: https://doi.org/10.25559/SITITO.14.201803.717-726.
6. Гаврилов А.Н. Подход к прогнозированию грузооборота морских портов на основе реализации потенциала грузовой базы // Транспортное дело России. 2021. № 4. С. 106–108. DOI: https://doi.org/10.52375/2072868920214106.
7. Pettit S.J., Beresford A.K.C. Port development: from gateways to logistics hubs // Maritime Policy & Management. 2009. Vol. 36. No. 3. P. 253–267. DOI: https://doi.org/10.1080/03088830902861144.
8. Monios J., Wilmsmeier G., Ng A.K.Y. Port system evolution – the emergence of second-tier hubs // Maritime Policy & Management. 2018. Vol. 46. No. 1. P. 61–73. DOI: https://doi.org/10.1080/03088839.2018.1468937.
9. Заостровских Е.А. Морские транспортные коридоры: изменения и перспективы развития в условиях современной экономики // Проблемы социально-экономического развития Сибири. 2025. № 1 (59). С. 24–32. DOI: https://doi.org/10.18324/2224-1833-2025-1-24-32.
10. Notteboom T.E., Rodrigue J.-P. Port regionalization: towards a new phase in port development // Maritime Policy & Management. 2005. Vol. 32. No. 3. P. 297–313. DOI: https://doi.org/10.1080/03088830500139885.
11. Nam H.-S., Song D.-W. Defining maritime logistics hub and its implication for container port // Maritime Policy & Management. 2011. Vol. 38. No. 3. P. 269–292. DOI: https://doi.org/10.1080/03088839.2011.572705.
12. Заостровских Е.А. Конфигурация сети морских транспортных коридоров // Экономическое развитие стран Северо-Восточной Азии в условиях глобальных

вызовов. Хабаровск: Институт экономических исследований ДВО РАН, 2024. С. 229–243.

References

1. Bardal A.B. Transportnyy kompleks Dal'nego Vostoka: natsional'nye i lokal'nye zadachi [Transport sector of the Far East: national and local tasks]. Regionalistika [Regionalistics], 2021, vol. 8, No. 6, pp. 53–67. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.14530/reg.2021.6.53.
2. Sidoryuk A.V., Krasova E.V. Rol' mezhdunarodnykh transportnykh koridorov v ekonomike Primorskogo kraya [The role of international transport corridors in the economy of Primorsky Krai]. Azimut nauchnykh issledovaniy: ekonomika i upravlenie [Azimuth of Scientific Research: Economics and Administration], 2019, vol. 8, No. 1 (26), pp. 311–314. (In Russ.).
3. Pavlenko V.V. Otsenka tranzitnogo potentsiala mezhdunarodnykh transportnykh koridorov "Primorye-1" i "Primorye-2" [Assessment of the transit potential of the international transport corridors "Primorye-1" and "Primorye-2"]. Tamozhennaya politika Rossii na Dal'nem Vostoke [Customs Policy of Russia in the Far East], 2017, No. 1 (78), pp. 55–63. (In Russ.).
4. Lazarev G.I., Krivelevich M.E. Integratsiya transportnykh prostranstv Rossii i ATR na primere Primorskogo kraya [Integration of transport spaces of Russia and the Asia-Pacific region by the example of Primorsky Krai]. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya [Modern Problems of Science and Education], 2013, No. 6, pp. 419–427. (In Russ.).
5. Evseev O.V., Murashov V.V., Zaboev A.I. Transportno-ekonomicheskiy balans i ego rol' v soglasovanii transportnogo planirovaniya v usloviyakh tsifrovoy transformatsii [Transport-economic balance and its role in coordinating transport planning under digital transformation]. Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie [Modern Information Technologies and IT-Education], 2018, vol. 14, No. 3, pp. 717–726. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.25559/SITITO.14.201803.717-726.
6. Gavrilov A.N. Podkhod k prognozirovaniyu gruzooborota morskikh portov na osnove realizatsii potentsiala gruzovoy bazy [An approach to forecasting seaport cargo turnover based on the realization of cargo base potential]. Transportnoe delo Rossii [Transport Business of Russia], 2021, No. 4, pp. 106–108. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.52375/2072868920214106.
7. Pettit S.J., Beresford A.K.C. Port development: from gateways to logistics hubs. Maritime Policy & Management, 2009, vol. 36, No. 3, pp. 253–267. DOI: https://doi.org/10.1080/03088830902861144.
8. Monios J., Wilmsmeier G., Ng A.K.Y. Port system evolution – the emergence of second-tier hubs. Maritime Policy & Management, 2018, vol. 46, No. 1, pp. 61–73. DOI: https://doi.org/10.1080/03088839.2018.1468937.
9. Zaostrovskikh E.A. Morskie transportnye koridory: izmeneniya i perspektivy razvitiya v usloviyakh sovremennoy ekonomiki [Maritime transport corridors: changes and development prospects in the modern economy]. Problemy sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Sibiri [Problems of the Socio-Economic Development of Siberia], 2025, No. 1 (59), pp. 24–32. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.18324/2224-1833-2025-1-24-32.
10. Notteboom T.E., Rodrigue J.-P. Port regionalization: towards a new phase in port development. Maritime Policy & Management, 2005, vol. 32, No. 3, pp. 297–313. DOI: https://doi.org/10.1080/03088830500139885.
11. Nam H.-S., Song D.-W. Defining maritime logistics hub and its implication for container port. Maritime Policy & Management, 2011, vol. 38, No. 3, pp. 269–292. DOI: https://doi.org/10.1080/03088839.2011.572705.
12. Zaostrovskikh E.A. Konfiguratsiya seti morskikh transportnykh koridorov [Configuration of the network of maritime transport corridors]. Ekonomicheskoe razvitie stran Severo-Vostochnoy Azii v usloviyakh global'nykh vyzovov [Economic development of the Northeast Asian countries under global challenges]. Khabarovsk, Economic Research Institute FEB RAS Publ., 2024, pp. 229–243. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Гулидов Руслан Витальевич, к.э.н., проректор по научной работе, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, 690003, Владивосток ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: gulidov@msun.ru

Ruslan V. Gulidov, Candidate of Economic Sciences, Vice-Rector for Research, Admiral Nevelskoy Maritime State University, 50a Verkhneportovaya st., Vladivostok, 690003, e-mail: gulidov@msun.ru

Холоша Михаил Васильевич, к.т.н., директор морского инженерного центра, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, 690003, Владивосток ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: holosha@msun.ru

Mikhail V. Holosha, Candidate of Technical Sciences, Director of Maritime Engineering Center, Admiral Nevelskoy Maritime State University, 50a Verkhneportovaya st., Vladivostok, 690003, e-mail: holosha@msun.ru

Гаврилов Александр Николаевич, к.т.н., заведующий научной лабораторией пространственной логистики, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, 690003, Владивосток ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: gavrilov@msun.ru

Alexander N. Gavrilov, Candidate of Technical Sciences, Head of Spatial Logistics Laboratory, Admiral Nevelskoy Maritime State University, 50a Verkhneportovaya st., Vladivostok, 690003, e-mail: gavrilov@msun.ru

Статья поступила в редакцию 01.06.2026; принята к публикации 10.08.2026; опубликована онлайн 20.09.2026. Received 01.06.2026; published online 20.09.2026.

УДК 656.6
DOI: 10.37890/jwt.vi87.698

Водный транспорт в XXI веке: барьеры роста и векторы развития в новой экономической реальности

Т.Н. Кашицына[1]
ORCID 0000-0001-9183-2811
М.Э. Ковалев[1,2]
ORCID 0009-0008-2840-3422
[1]*Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир, Россия*
[2]*Филиал ООО «Международная Транспортно-Экспедиционная Компания Цяньтун», г. Шанхай, Китай*

Аннотация. В данной статье анализируются проблемы и перспективы развития водного транспорта в современной экономике. Несмотря на важную роль морского транспорта в решении экономических задач, его функционирование сопряжено с рядом системных ограничений. Ключевые вопросы включают состояние водных путей и гидротехнических сооружений, технический уровень флота, а также финансово-экономическое положение судоходных компаний и занятость портов. Экологическое воздействие судоходной деятельности также остается актуальной проблемой. В то же время водный транспорт обладает значительным потенциалом развития, реализация которого способствует внедрению инновационных проектов, интенсификации международного сотрудничества и углублению взаимодействия с другими транспортными инструментами. Такое развитие будет способствовать повышению конкурентоспособности водного транспорта и увеличению его вклада в национальную экономику.

Ключевые слова: Водный транспорт, экологические проблемы, морские перевозки, борьба с загрязнением.

Water transport in the 21st century: barriers to growth and development vectors in the new economic reality

Tatyana N. Kashitsina[1]
ORCID 0000-0001-9183-2811
Maxim E. Kovalev[1,2]
ORCID 0009-0008-2840-3422
[1]*Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia*
[2]*Branch of Qiantong International Freight Forwarding Company, Shanghai, China*

Abstract. This article analyzes the problems and prospects of the development of water transport in the modern economy. Despite the important role of maritime transport in solving economic problems, its operation is subject to a number of systemic limitations. Key issues include the condition of waterways and hydraulic structures, the technical level of the fleet, as well as the financial and economic situation of shipping companies and the employment of ports. The environmental impact of shipping activities also remains a pressing issue. At the same time, water transport has significant development potential, which can be realized through the implementation of innovative projects, increased international cooperation, and deeper integration with other transportation tools. Such development will contribute to increasing the competitiveness of water transport and its contribution to the national economy.

Keywords*:* Water transport, environmental issues, maritime transportation, and pollution control

Введение

Водный транспорт исторически является фундаментом международной торговли, обеспечивая связность мировых рынков и доступность ресурсов. Начало XXI века стало для водного транспорта эпохой парадоксов. С одной стороны, он остаётся безальтернативной основой локализированной экономики, обеспечивая около 80% мировой торговли. С другой – отрасль столкнулась с тройным вызовом: геополитической турбулентностью, цифровой революцией и, что особенно критично, жёсткими экологическими требованиями.

Международные нормы международной морской организации (ИМО) по снижению выбросов углерода, серы и азота, а также растущее давление со стороны инвесторов и потребителей ставят под вопрос традиционные операционные модели. Современное судоходство стоит перед необходимостью не просто роста, а глубокой «зелёной» трансформации, чтобы оставаться легитимным в глазах мирового сообщества.

Внутренние барьеры развития отрасли усугубляют воздействие внешних факторов. Ключевыми проблемными зонами выступают критическое старение мирового флота, дефицит квалифицированного персонала и износ портово-инфраструктурного комплекса. Фактические данные свидетельствуют об устойчивой тенденции увеличения доли судов старше 15 лет, что коррелирует с ростом аварийности и экологических рисков. Одновременно отрасль сталкивается с кадровым разрывом: системы подготовки специалистов не успевают за темпами технологических изменений, а условия труда теряют привлекательность для нового поколения профессионалов.

Традиционная модель развития водного транспорта, ориентированная на масштабирование тоннажа и минимизацию операционных затрат за счет дешевого топлива, становится нежизнеспособной. Современные требования стейкхолдеров смещаются в сторону прозрачности, безопасности и экологической ответственности. В связи с этим возникает необходимость комплексного анализа барьеров, препятствующих адаптации отрасли, и выявления приоритетных векторов ее развития.

Статья исследует ключевые барьеры, сдерживающие рост водного транспорта в современных условиях – от цифрового разрыва и кадрового дефицита до экологического давления и регуляторной турбулентности, – а также определяет стратегические векторы его адаптации и развития. Будущее отрасли видится не в простом наращивании тоннажа, а в трансформации в гибкую, интеллектуальную и устойчивую систему.

Способы научного познания

Водный транспорт – это категория транспортных средств, предназначенных для перемещения по естественным или искусственным водным путям с целью доставки грузов и пассажиров между пунктами назначения [1]. К естественным путям относятся созданные природой акватории: океаны, моря, реки. Искусственные пути включают сооружения, построенные человеком, такие как каналы, водохранилища и шлюзовые системы.

Высокая провозная способность и низкая себестоимость делают водный транспорт экономически выгодным, особенно для перевозки крупногабаритных грузов. При этом его важнейшая функция – связывать территории, разделённые водными пространствами (континенты, острова) или не имеющие развитой наземной инфраструктуры.

Применение водного транспорта играет ключевую роль в решении экономических задач, оказывающих влияние на развитие как отдельных стран, так и мировой экономики в целом. К его основным преимуществам относятся:

1. Экономическая эффективность: водный транспорт, особенно морские перевозки, является одним из самых экономичных способов транспортировки крупных партий грузов (например, сырья, контейнеров, нефти) на дальние расстояния.
2. Высокая провозная способность: суда, такие как балкеры, танкеры и контейнеровозы, способны перевозить огромные объемы, недоступные для других видов транспорта.
3. Международная торговля: служит основой глобальной логистики, обеспечивая более 80% мирового товарооборота и связывая континенты и экономики.
4. Развитие регионов: освоение речных и морских путей стимулирует рост портовой инфраструктуры, создает рабочие места и способствует развитию прибрежных и внутренних регионов.
5. Экологичность: при пересчете на тонно-километр водный транспорт часто имеет меньший углеродный след по сравнению с авиа- или автомобильными перевозками.

Целью работы является комплексный анализ проблем и перспектив развития водного транспорта в современной экономике, включая выявление ключевых барьеров роста (экологических, технических, кадровых) и определение стратегических векторов его адаптации и устойчивого развития в новой экономической реальности.

Методы и материалы

Развитие водного транспорта сдерживается совокупностью внешних и внутренних факторов, создающих зону турбулентности для участников рынка.

Стоит отметить, что не все виды водного транспорта настолько экологичные и безопасные для окружающей среды. Морские перевозки хоть и играют важную роль в мировой торговле, но неблагоприятно влияют на флору и фауну. Основным источником загрязнения в судоходстве является сжигание топлива в двигателях, в результате которого образуются оксиды углерода, серы и азота. По оценкам 2019 года, вклад морского транспорта в общие выбросы сектора составлял от 5 до 10% [2]. Флот международного торгового судоходства, насчитывающий свыше 52 000 крупнотоннажных судов, ежегодно потребляет астрономический объем энергоносителей — свыше 2 миллиардов баррелей судового топлива. Принципиальная проблема заключается в химическом составе этого энергоресурса: традиционный тяжелый мазут (HFO), остаточный продукт нефтепереработки, содержит до 3.5% серы. [3]. Это делает его исключительно «грязным»: концентрация сернистых соединений в нем может превосходить аналогичный показатель для стандартного автомобильного дизельного топлива, используемого, например, в США, более чем в 1800 раз [4].

Другой важной проблемой является нехватка квалифицированного персонала. Развитие человеческого потенциала (знания, навыки, способности) – ключевой элемент профессионального роста в любой области, так как способствует осознанию своей социальной роли. Для морского и речного флота эта задача является исключительно актуальной, что подтверждается показателями, отображёнными на рисунке 1.

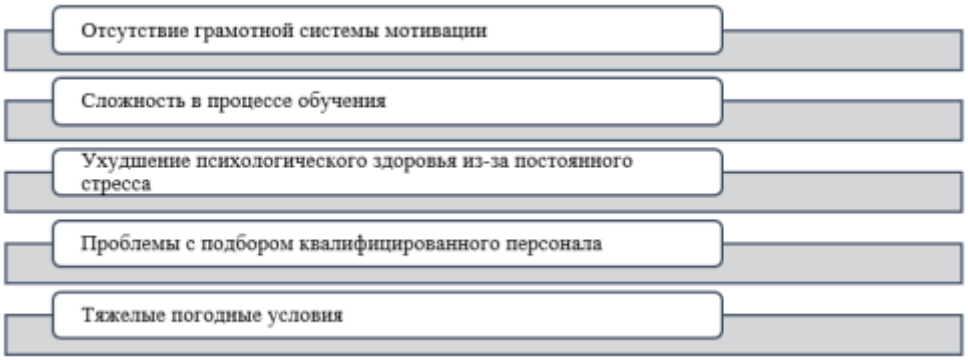


Рис 1. Факторы, влияющие на человеческий потенциал на флоте

Пожалуй, одним из самых ключевых параметров для определения загрязнения окружающей среды мировым флотом является его возраст [5]. Примечательно, что в течение последних двух лет, старение мирового торгового флота наблюдалось абсолютно по всем сегментам. Этот процесс сопровождался заметным (особенно для сухогрузов) сокращением доли судов моложе 10 лет и весьма чувствительным (особенно для контейнеровозов) увеличением доли возрастных судов (от 15-ти лет и старше) см. таблицу 1.

Таблица 1

Динамика распределение мирового торгового флота по возрасту 2020-25 гг (%)

Тип судов/возраст	До 10 лет		До 10-14 лет		15 и более лет	
	2020	2025	2020	2025	2020	2025
Балкеры	61	48	19	31	19	21
Контейнеровозы	36	32	33	28	31	40
Наливные танкеры	33	30	20	21	47	49
Суда под генгруз	17	15	16	17	67	68
Прочие	30	26	16	18	55	57

Старение мирового торгового и пассажирского флота создает прямую и растущую угрозу безопасности мореплавания и экологической уязвимости акваторий планеты [6]. Увеличение среднего возраста судов ведет к закономерному росту количества аварийных происшествий, каждое из которых несет в себе потенциал для катастрофического загрязнения морской среды.

Развитие водного транспорта в XXI веке требует перехода от экстенсивной модели к качественной трансформации. На основе вышесказанного представим модель развития водного транспорта в новой экономической реальности (рис. 2). Данная модель представляет собой концептуальную схему, визуализирующую системную трансформацию отрасли водного транспорта под воздействием совокупности внутренних ограничений и внешних макроэкономических факторов.

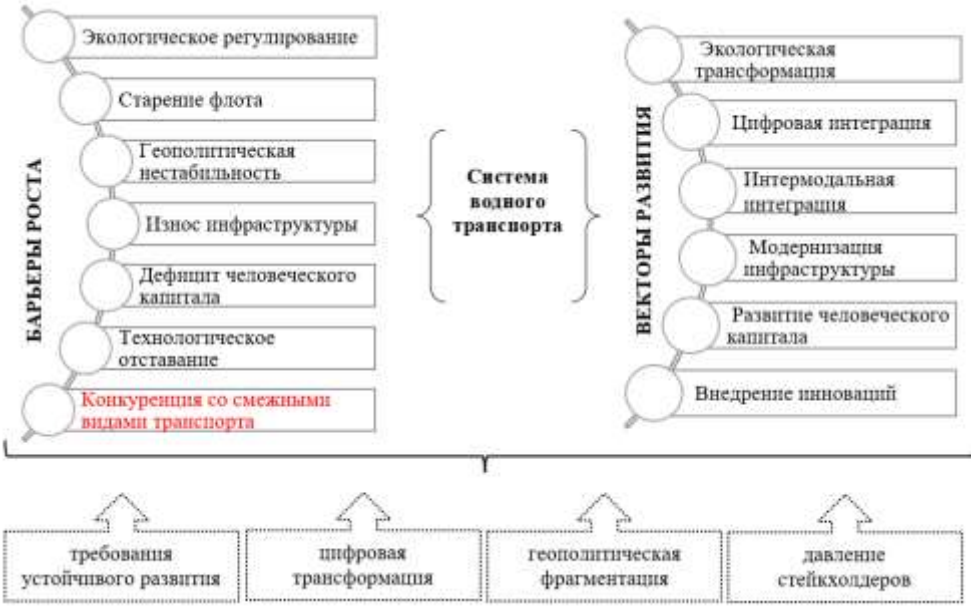


Рис. 2. Модель развития водного транспорта в новой экономической реальности

Представленная модель демонстрирует системный подход к трансформации водного транспорта, показывая взаимосвязь между существующими ограничениями, стратегическими направлениями развития и факторами внешней среды. Модель построена по принципу «вызовы → ответы» и отражает необходимость адаптации отрасли к условиям новой экономической реальности.

Блок барьеров роста, объединяет семь ключевых ограничений, сдерживающих развитие отрасли. Центральный элемент модели – система водного транспорта – представляет собой комплексную инфраструктуру, включающую морской и речной флот, портовые терминалы, судостроительную и судоремонтную базу, а также систему управления и регулирования. Блок векторов развития состоит из шести стратегических направлений преодоления барьеров и трансформации отрасли.

Нижняя часть модели отражает фундамент новой экономической реальности, формирующий контекст трансформации водного транспорта. Этот блок включает четыре макротренда. Во-первых, требования устойчивого развития, закреплённые в целях ООН, Парижском соглашении и ESG-стандартах, делают экологическую ответственность обязательным условием легитимности бизнеса. Во-вторых, цифровая трансформация как часть Четвёртой промышленной революции определяет необходимость цифровой зрелости для сохранения конкурентоспособности [7]. В-третьих, геополитическая фрагментация, проявляющаяся в торговых конфликтах и регионализации цепочек поставок, требует от отрасли гибкости и диверсификации логистических маршрутов. В-четвёртых, давление стейкхолдеров – инвесторов, потребителей, регуляторов и общества – формирует новые ожидания в отношении прозрачности, устойчивости и социальной ответственности судоходных компаний [8].

Таким образом, модель показывает, что устойчивое развитие водного транспорта в XXI веке возможно не через экстенсивное наращивание тоннажа, а через качественную трансформацию, синтезирующую экологическую реконструкцию, цифровую интеграцию и гуманизацию отрасли. Успешная реализация данной модели позволит водному транспорту не только преодолеть системные барьеры роста, но и

стать одним из драйверов формирования новой, устойчивой и ответственной глобальной экономики.

Результаты

Стратегии и технологии по снижению экологического следа морского и речного транспорта.

Снижение негативного воздействия судов на экосистему – комплексная задача, которая включает меры на международном, национальном и оперативном уровнях. Хотя масштаб этих проблем выглядит внушительным, пути для минимизации антропогенной нагрузки на экосистему существуют [9]. Комплекс соответствующих мер систематизирован в таблице 2.

Таблица 2

Комплекс мер по защите окружающей среды от негативного воздействия кораблей

Меры	Описание
Снижение загрязнения воздуха	- Использование малосернистого топлива (согласно правилам ИМО 2020), сжиженного природного газа (СПГ), метанола, водорода или аммиака. - Установка скрубберов (для удаления серы) и каталитических нейтрализаторов (для снижения выбросов NOx).
Предотвращение загрязнения воды	- Обязательная установка систем обработки балластных вод для предотвращения переноса инвазивных видов. - Строгий учет и сдача в портовых приемных сооружениях всех видов отходов (пластик, пищевые, нефтесодержащие, льяльные воды, мусор). Запрет на сброс мусора в море (MARPOL).
Защита морской фауны	- Оптимизация конструкции гребных винтов и корпуса, снижение скорости, использование бульбообразной носовой оконечности. Шум нарушает навигацию, коммуникацию и питание китов, дельфинов. - Создание искусственных рифов, «зеленые» набережные для поддержания местных экосистем.
Инновации и будущие технологии	- Инвестиции в суда на аккумуляторных батареях (для коротких рейсов) или на топливных элементах. - Внедрение зеленых технологий: Использование энергии ветра (паруса, жесткие паруса-крылья), солнечных батарей, систем рекуперации тепла.

Стоит отметить появление новых видов речного транспорта в связи с развитием технологий. Например, в Москве состоялся запуск первого в мире круглогодичного речного трамвая на электрической тяге. Церемонию открытия нового маршрута по Москве-реке посетили президент России и мэр столицы. На линии работают современные электроходы, названные в честь столичных рек, таких как «Синичка», «Яуза» и «Пресня» [10]. Вместимость каждого судна – до 50 человек, на борту есть Wi-Fi, система кондиционирования и розетки для зарядки устройств. На причалах для пассажиров построены удобные павильоны. Проезд входит в единую сеть городского транспорта: для оплаты подойдёт карта «Тройка» или обычная банковская карта, а при пересадке действует льготный тариф.

Также системное изучение потребностей работников морского и речного флота выступает ключевым инструментом для формирования эффективной кадровой политики. Выявление этих потребностей позволяет не только разработать адресные программы мотивации, но и оптимизировать условия труда, что в совокупности создает фундамент для целенаправленного развития человеческого потенциала в отрасли.

Построение научно обоснованной системы мотивации представляет собой стратегическую задачу для любой организации, особенно в специфических условиях морской индустрии, характеризующихся длительной изоляцией, повышенными профессиональными рисками и особым психофизиологическим напряжением. Корректная диагностика потребностей сотрудника на этапе найма и последующее создание соответствующих организационных условий – включая гарантии социальной защищенности, возможности карьерного и профессионального роста, а также обеспечение достойного уровня быта на судне – напрямую влияют на ключевые показатели.

Заключение

Исследование показало, что современный водный транспорт переживает эпоху глубокой трансформации. Будучи основой мировой торговли, отрасль столкнулась с необходимостью кардинального пересмотра своих принципов под давлением экологических требований, цифровой революции и растущего дефицита квалифицированных кадров. Анализ показал, что ключевыми сдерживающими факторами развития являются не внешние кризисы, а внутренние системные противоречия.

Как показал анализ, ключевыми барьерами на пути развития отрасли являются:

1. Экологический прессинг, усугубляемый старением флота, которое напрямую коррелирует с ростом аварийности и катастрофическим потенциалом загрязнения.
2. Системный кадровый дефицит, угрожающий безопасности и технологической трансформации.
3. Регуляторная и технологическая турбулентность, требующая огромных капиталовложений в «зелёный» переход.

Главный парадокс заключается в том, что экономическая модель, десятилетиями строившаяся на эксплуатации долговечных судов, сегодня стала источником рисков. Старение флота – это не просто статистический показатель, а прямая причина роста аварийности и хронического загрязнения окружающей среды. Одновременно отрасль страдает от кадрового разрыва, когда традиционные условия труда и система подготовки не соответствуют запросам нового поколения специалистов и сложности внедряемых технологий.

Преодоление этих барьеров требует не постепенных улучшений, а стратегического переформатирования всей отрасли. Путь вперёд лежит через синтез трёх фундаментальных направлений:

– Экологическая реконструкция, означающая переход от борьбы с последствиями (установка скрубберов) к созданию новой технологической базы (топливо с нулевым углеродным следом, суда на электрической и водородной тяге).

– Цифровая интеграция, которая должна ликвидировать разрыв между передовыми технологиями (искусственный интеллект, автономное судовождение) и реальной эксплуатационной практикой, повысив безопасность и эффективность.

– Гуманизация отрасли, предполагающая превращение морской профессии в современную, высокотехнологичную и социально привлекательную сферу деятельности через пересмотр систем мотивации, обучения и условий труда.

Будущее водного транспорта видится не в количественном росте, а в качественном преобразовании. Успех этой трансформации позволит отрасли не

только сохранить свою критически важную роль в глобальной логистике, но и стать одним из драйверов формирования новой, ответственной экономики.

Список литературы

1. Бабурина О.Н., Кондратьев С.И. Морские порты мира и России: динамика грузооборота и перспективы развития // Транспортное дело России. 2022. No. 6. С. 141–145
2. Батанина, Е. А. Оценка возможного размера вреда при аварийных сбросах сыпучих грузов с судов / Е. А. Батанина, О. Л. Домнина // Морские интеллектуальные технологии. – 2023. – № 3-1(53). – С. 192-199
3. Картамышева, Е. С. Судно как источник загрязнения окружающей среды / Е. С. Картамышева, Д. С. Иванченко, Е. А. Бекетова. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2018. — № 25 (211). — С. 12-15. — URL: https://moluch.ru/archive/211/51586. (дата обращения: 05.02.2026)
4. Трофимов А.А. Загрязнение мирового океана: причины, последствия и пути решения проблемы // Международный школьный научный вестник. 2024. № 3.; URL: https://school-herald.ru/ru/article/view?id=1609 (дата обращения: 09.02.2026)
5. Чеботарев С.С. Инновационный механизм регулирования и повышения эффективности высокотехнологичных производств / Чеботарев С.С., Жданов В.Л.// Экономика и управление: проблемы, решения. 2024. Т. 5. № 3 (144). С. 171-177.
6. Ерлыгина Е.С., Шабанова Е.М. Проблемы и перспективы развития водного транспорта в современных экономических условиях // Научные проблемы водного транспорта. 2024. № 81. С. 108-116.
7. Бухалкин Д.Д., Костров В.Н. Научно-методические подходы к оценке влияния инновационных цифровых технологий и услуг на трансформацию цепей поставок продукции // Научные проблемы водного транспорта. 2025. № 84 (3). С. 115-129.
8. Ползунова Н.Н. Гибкость и инновационная активность предприятий текстильной промышленности: учет взаимосвязи в стратегии управления // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2024. № 6 (414). С. 89-96.
9. Тындыкарь Ю.В., Тындыкарь Л.Н. Бизнес-процессы в интегрированных транспортнотехнологических системах // Морские вести России. 2025. № 1 (178). С. 164-168.
10. Интерфакс. Открытие нового водного транспорта в Москве. [электронный ресурс]. URL: https://www.interfax.ru/moscow/908239 (дата обращения 07.02.2026).

References

1. Baburina O.N., Kondratyev S.I. Seaports of the World and Russia: Dynamics of Cargo Turnover and Development Prospects // Transport Business of Russia. 2022. No. 6. Pp. 141–145
2. Batanina, E. A. Assessment of the Possible Amount of Damage in Case of Emergency Discharge of Bulk Cargo from Ships / E. A. Batanina, O. L. Domnina // Marine Intellectual Technologies. – 2023. – No. 3-1(53). – Pp. 192-199
3. Kartamysheva, E. S. The Ship as a Source of Environmental Pollution / E. S. Kartamysheva, D. S. Ivanchenko, E. A. Beketova. — Text: direct // Young Scientist. — 2018. — № 25 (211). — P. 12-15. — URL: https://moluch.ru/archive/211/51586 . (date of request: 02/05/2026)
4. Trofimov A.A. Pollution of the world ocean: causes, consequences and ways to solve the problem // International School Scientific Bulletin. 2024. No. 3.; URL: https://school-herald.ru/ru/article/view?id=1609 (date of request: 02/09/2026)
5. Chebotarev S.S. Innovative mechanism for regulating and increasing the efficiency of high-tech production / Chebotarev S.S., Zhdanov V.L.// Economics and Management: Problems, Solutions. 2024. Vol. 5. No. 3 (144). Pp. 171-177.

6. Erlygina E.S., Shabanova E.M. Problems and prospects of water transport development in modern economic conditions // Scientific problems of water transport. 2024. No. 81. Pp. 108-116.
7. Bukhalkin D.D., Kostrov V.N. Scientific and Methodological Approaches to Assessing the Impact of Innovative Digital Technologies and Services on the Transformation of Product Supply Chains // Scientific Problems of Water Transport. 2025. No. 84 (3). Pp. 115-129.
8. Polzunova N.N. Flexibility and Innovative Activity of Textile Industry Enterprises: Considering the Relationship in Management Strategies // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2024. No. 6 (414). Pp. 89-96.
9. Tyndykar Yu.V., Tyndykar L.N. Business Processes in Integrated Transport and Technological Systems // Morskiye Vesti Rossii. 2025. No. 1 (178). Pp. 164-168.
10. Interfax. Opening of a new water transport in Moscow. [electronic resource]. URL: https://www.interfax.ru/moscow/908239 (accessed on 07.02.2026).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Кашицына Татьяна Николаевна, к.э.н., доцент кафедры менеджмента и маркетинга, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ), 600000 г. Владимир, Россия, г. Владимир, ул. Горького, 87, e-mail: kashicina@yandex.ru

Tatyana N. Kashitsina, PhD in Economics, Associate Professor of the Department of Management and Marketing, Vladimir State University, 600000 Vladimir, Russia, Gorky Street, 87, e-mail: kashicina@yandex.ru

Ковалев Максим Эрнестович, аспирант кафедры менеджмента и маркетинга, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ), 600000 г. Владимир, Россия, г. Владимир, ул. Горького, 87, e-mail: maxkov219953@gmail.com; менеджер по ВЭД, филиал ООО «Международная Транспортно-Экспедиционная Компания Цяньтун», г. Шанхай, Китай

Maxim E. Kovalev, Postgraduate student of the Department of Management and Marketing, Vladimir State University, 600000 Vladimir, Russia, Vladimir, Gorky str., 87, e-mail: maxkov219953@gmail.com; Foreign Economic Activity Manager, Branch of Qiantong International Freight Forwarding Company, Shanghai, China

Статья поступила в редакцию 13.03.2026; принята к публикации 30.05.2026; опубликована онлайн 20.09.2026. Received 13.03.2026; published online 20.09.2026.

УДК 338.47:656.62
DOI: 10.37890/jwt.vi88.724

Инновационная транспортная услуга как драйвер роста экономики

Д.А. Коршунов
ORCID: 0000-0002-9908-4026
А.П. Бафанов
ORCID: 0000-0002-8656-6456
Волжский государственный университет водного транспорта», г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В статье рассматривается новый этап развития скоростных пассажирских перевозок по внутренним водным путям РФ. Данная перевозка, с учетом показанных вариантов её развития является инновационной транспортной услугой, оказывающей влияние на экономику приречных регионов России. В методах на основе анализа реализации федерального проекта «Речные магистрали» и практик Нижегородской области, Татарстана и Чувашии выявлены ключевые экономические эффекты: рост связности территорий и мобильности населения, стимулирование туристического потока, увеличение доходов бюджетов различных уровней, загрузка мощностей судостроительной промышленности и оптимизация бюджетных расходов на транспортную инфраструктуру. В исследовании применялись методы системного и сравнительного анализа статистических данных пассажиропотока за 2023–2025 гг. В качестве результата исследования приведена модель кластера инновационных скоростных пассажирских перевозок. В обсуждение вынесены виды эффектов от функционирования кластера и условия его устойчивого развития. Делается вывод о том, что развитие скоростного водного транспорта становится драйвером экономического роста и инструментом реализации транзитного потенциала приречных регионов и страны в целом. Статья подготовлена на основе результатов исследования в рамках проекта «Речные магистрали».

Ключевые слова: скоростные суда на подводных крыльях, «Речные магистрали», экономика приречных регионов, пассажирские перевозки, транспортная инфраструктура, мультимодальные перевозки, внутренний водный транспорт, региональное развитие.

Innovative transport service as a driver of economic growth

Dmitry A. Korshunov
ORCID: 0000-0002-9908-4026
Artem P. Bafanov
ORCID: 0000-0002-8656-6456
Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article considers a new stage in the development of high-speed passenger transportation along the inland waterways of the Russian Federation. This transportation, taking into account the shown options for its development, is an innovative transport service that has an impact on the economy of the riverine regions of Russia. Based on the analysis of the implementation of the federal project «River Highways» and the practices of the Nizhny Novgorod region, Tatarstan and Chuvashia, key economic effects have been identified in the methods: increased connectivity of territories and population mobility, stimulating tourist flow, increasing budget revenues at various levels, capacity utilization of the shipbuilding industry and optimizing budget expenditures on transport infrastructure. The study used methods of systematic and comparative analysis of passenger traffic statistics for 2023-2025. As a result of the research, a model of a cluster of innovative high-speed passenger

transportation is presented. The types of cluster functioning effects and the conditions for its sustainable development are discussed. It is concluded that the development of high-speed water transport is becoming a driver of economic growth and a tool for realizing the transit potential of the riverine regions and the country as a whole. The article is based on the results of a study conducted within the framework of the River Highways project.

Keywords: high-speed hydrofoils, «River highways», economy of riverine regions, passenger transportation, transport infrastructure, multimodal transportation, inland waterway transport, regional development.

Введение

В условиях исчерпания пропускной способности автомобильных и железнодорожных магистралей в европейской части России (особенно в летний период) актуальность приобретает поиск резервов повышения транспортной мобильности. Одним из таких резервов выступает внутренний водный транспорт (ВВП), потенциал которого в России используется недостаточно: грузонапряженность ВВП в восемь раз ниже, чем за рубежом, при этом бюджетные расходы на содержание 1 км водного пути в семь раз меньше, чем на содержание аналогичного участка автодороги и в два раза меньше аналогичного железнодорожного пути [1].

Целью данной статьи является разработка модели транспортно-экономического кластера на базе ВВП. Новизна работы заключается в рассмотрении данного направления не просто как вида транспорта, а как системообразующего фактора, запускающего цепочку смежных эффектов: от оживления малого бизнеса в приречных населенных пунктах до загрузки высокотехнологичных судостроительных предприятий. Задачами настоящего исследования выступали:

– комплексный анализ влияния инновационной услуги — скоростных пассажирских перевозок судами на подводных крыльях (СПК) типа «Валдай 45Р», «Метеор 120Р», «Метеор 2020» — на социально-экономическое развитие приречных регионов и страны в целом;

– разработка структуры кластера, драйверов его развития, видов эффектов от его функционирования и факторов устойчивого развития.

Методы

Теоретической и методологической базой послужили труды авторов настоящей статьи и других экспертов Волжского государственного университета водного транспорта (ВГУВТ), Института экономики транспорта и транспортной политики НИУ ВШЭ, экспертного сообщества [2-9], данные Росморречфлота, судоходных компаний-участников проекта «Речные магистрали», а также администраций приречных населенных пунктов, охваченных маршрутной сетью проекта. Эмпирическую базу составили отчетные данные судоходных компаний (ООО «Водолёт», АО «Флот РТ» и АО «Чебоксарский речной порт»), статистика пассажиропотоков за навигацию 2024–2025 годов, а также материалы Третьей Всероссийской конференции «Реки. Круизы. Маршруты». Использовались методы сравнительного и системного анализа, результаты моделирования мультипликативного эффекта от развития маршрутной сети проекта, позволяющие оценить макроэкономические эффекты от внедрения скоростного сообщения [10].

В первую очередь авторы отмечают инфраструктурные предпосылки и механизмы государственной поддержки. Современный этап развития речных перевозок связан с реализацией национального проекта «Эффективная транспортная система» и федерального проекта «Речные магистрали», запущенного Минтрансом России в 2024 году. Проект направлен на создание бесшовных мультимодальных

маршрутов и устранение «узких мест» — участков с недостаточными глубинами. Ключевыми инфраструктурными проектами стали строительство Багаевского гидроузла на Дону и модернизация Городецкого гидроузла на Волге, которые после завершения обеспечат гарантированные глубины (до 4 метров) для пропуска большегрузных и скоростных судов. Важнейшим фактором успеха стала финансовая модель государственно-частного партнерства и её организационно-экономическое обоснование учёными-экспертами в части проектных параметров и эффективности данной воднотранспортной системы. Для реализации проекта сформирована организационная структура, она показана на рис.1.



Рис.1. Организационная структура проекта «Речные магистрали»

Таким образом проект представляет собой синергетический сплав взаимодействия федеральных и региональных органов исполнительной власти, компаний скоростного флота и научно-образовательного учреждения (ВГУВТ), позволяющий быстро реализовать запуск маршрутов скоростных пассажирских перевозок по ВВП при наличии флота и причальной инфраструктуры.

Динамика ключевых показателей проекта, включая объем государственного финансирования (субсидирования) перевозок за период 2024-2026 гг. показан в табл.1

Таблица 1

Динамика показателей проекта «Речные магистрали»

Показатель	Ед. измерения	Год реализации проекта		
		2024	2025	2026
Число регионов, охваченных маршрутной сетью проекта	Ед.	5	12	15*
Число межрегиональных маршрутов	Ед.	12	14	25*
Количество используемых судов	Ед.	7	5	8*
Число рейсов	Ед.	562	645	852*
Количество перевезенных пассажиров	Чел.	33264	34597	52000*
Размер государственной субсидии	Млн. руб.	45,6	17,7	94,8*

**Плановое значение*

Субсидирование перевозок осуществляется по принципу «треть-треть-треть»: одна треть затрат компенсируется из федерального бюджета (в рамках проекта

«Речные магистрали»), вторая треть — из бюджетов регионов, и одна треть покрывается за счет тарифа перевозчика.

Результаты

В качестве результатов настоящего исследования авторы предлагают модель транспортно-экономического кластера и систему факторов эффективности развития воднотранспортной системы скоростных пассажирских перевозок по внутренним водным путям РФ, выступающих драйверами роста экономики.

На эффективность проекта оказывают влияние такие меры государственной поддержки как субсидирование навигационных расходов перевозчиков, льготный лизин инновационных скоростных судов, льготный режим налогообложения для судов, зарегистрированных в Российском морском реестре судов (РМРС) и др. [11]. Эти меры позволяют сдерживать стоимость проездных билетов, делая данное сообщение доступным для населения и конкурентоспособным с альтернативными видами транспорта, и одновременно гарантировать перевозчикам возврат инвестиций.

Вторым важным фактором эффективности скоростных пассажирских сообщений по внутренним водным путям выступает транспортная связность территорий страны и наличие пассажиропотоков в транзитном (межрегиональном) сообщении. Так как, в отдельных случаях такое сообщение вовсе не имеет альтернативы с точки зрения постоянного транспортного сообщения с приречными населенными пунктами агломераций. Запуск скоростного сообщения по ВВП качественно изменил транспортную доступность. Например, столица Чувашии — Чебоксары — не имеет прямого железнодорожного сообщения с Нижним Новгородом и Казанью. Благодаря организации речных пассажирских линий эти города оказались связаны прямым скоростным сообщением.

Анализ статистических данных, полученных авторами в ходе обоснования и реализации проекта «Речные магистрали» (табл. 1) демонстрирует ежегодный рост популярности услуги. В Нижегородской области, ставшей флагманом возрождения отрасли, компания «Водолёт» увеличила пассажиропоток с 81,4 тыс. человек в 2023 году до 125,3 тыс. в 2024 году (рост 54%). В 2025 году тенденция сохранилась, а маршрутная сеть воднотранспортного проекта охватила уже 12 регионов, протянувшись от Твери на севере до Волгограда на юге, то есть охватывает приречные территории верхней Волги и среднего Поволжья. В целом по стране за первое полугодие 2025 года объем речных пассажирских перевозок вырос на 30%, причем наиболее динамично развивались именно междугородние маршруты (рост 37%) и внутригородские линии (рост в 3,5 раза).

Третьим фактором эффективности воднотранспортной системы скоростных пассажирских перевозок выступает мультипликативный эффект для экономики вовлеченных регионов и страны в целом. Влияние скоростных перевозок выходит далеко за рамки транспортной отрасли и проявляется в нескольких плоскостях [10]:

1) Развитие туризма. Возможность быстро добраться до малых исторических городов (например, Макарьева, Свияжска, Городца) сделала их доступными для однодневных туристических поездок. Речные маршруты интегрируются в туристические программы, что приводит к росту выручки объектов общепита, гостиничного бизнеса и музеев. Согласно опыту составных рейсов «Нижний Новгород — Тверь» и «Нижний Новгород — Волгоград», пассажиры получают возможность осматривать города в ходе промежуточных остановок, что превращает поездку в тур выходного дня. Республики Чувашия и Татарстан уже включили развитие причальной инфраструктуры (удлинение стенок, строительство марин) в свои стратегии развития туризма до 2030 года.

2) Загрузка промышленности и кадровый потенциал. Возрождение флота стимулирует судостроительную отрасль. Основные стейкхолдеры здесь Зеленодольский завод имени А.М. Горького в Татарстане и ЦКБ по СПК имени Алексеева в Нижегородской области. Потребность в новых судах высока: только на первом этапе проекта «Речные магистрали» дополнительная потребность оценивалась в 18 единиц скоростного флота – судов на подводных крыльях (СПК). По состоянию на начало 2026 года судоходные компании-участники проекта эксплуатируют 9 СПК.

Между тем, постройка СПК создает рабочие места не только на верфях, но и у смежников — производителей комплектующих (например, чувашские предприятия «Элара», «ВНИИР» уже поставляют детали для «Метеоров»).

3) Оптимизация бюджетных расходов, как обосновывают авторы статьи [10], видна при переключении пассажиров с автотранспорта и железной дороги на воду, что снижает нагрузку на дорожную сеть смежных видов транспорта и дает экономию бюджетные средства на ее содержание и капитальный ремонт.

Инновационные пассажирские перевозки имеют значительный социально-экономический эффект, возвращая средства субсидии через налоги от растущего туристического и промышленного секторов. Данный эффект поддерживается за счет комплексной инновационной составляющей данной транспортной услуги и связан с интересом населения к новшествам и её качественным характеристикам.

Для наглядного представления механизма влияния скоростных перевозок на экономику авторами разработана концептуальная модель «Транспортно-экономический кластер на базе ВВП», представленная на рис.2 в виде структурно-логической схемы, показывающей как государственная поддержка и частные инвестиции в один элемент воднотранспортной системы запускают рост в нескольких смежных секторах экономики.



Рис. 2. Модель: «Транспортно-экономический кластер на базе ВВП»

Данная модель базируется на взаимодействии трех уровней драйверов: базисного (инфраструктура, кадры и наука), транспортного (инновационная услуга) и социально-экономического (последствия и эффекты). Вербальное изложение модели выглядит следующим образом:

1. Базовый уровень (Инвестиционный импульс). Это отправная точка, государственные и частные вложения.

– Драйвер: Строительство скоростных судов (СПК типа «Валдай», «Метеор»).

– Драйвер: Реконструкция причальной инфраструктуры (причалы, вокзалы) и дноуглубление (проект «Речные магистрали»).

– Эффект первого порядка: Загрузка судостроительных заводов (рост промышленного производства), создание рабочих мест в строительстве и судостроении, развитие смежных производств (приборостроение, электроника).

2. Транспортный уровень (процессы и результаты). Эффекты от непосредственное функционирование системы и операционной деятельности.

– Драйвер: Сокращение времени в пути (скорость 65-75 км/ч и нет пробок).

– Драйвер: регулярность и доступность.

– Эффект второго порядка: рост пассажиропотока. Субсидирование тарифа, а значит увеличение доступности для населения и увеличение покупательской способности. Повышение транспортной подвижности (мобильности) населения. Формирование устойчивых межрегиональных связей (трудовая миграция, деловые поездки, укрепление семейных и родственных связей).

3. Социально-экономический уровень (конечные эффекты). Здесь возникают основные выгоды для приречных регионов:

– Туристический драйвер - доступность малых городов и исторических мест (однодневные туры); рост турпотока, а значит загрузка гостиниц, кафе, музеев. Эффект: Рост выручки сектора услуг и налоговых поступлений в бюджет.

– Деловой и логистический драйвер: упрощение коммуникации между бизнес-центрами граничащих приречных регионов; интеграция с другими видами транспорта (мультимодальные перевозки: река-авто-ж/д). Эффект: рост деловой активности, привлечение кадров, снижение логистических издержек для пассажиров.

– Бюджетный драйвер (Косвенная экономия): снижение нагрузки на автодорожную и железнодорожную сеть в пиковый летний период; меньший износ дорожного полотна. Эффект: экономия бюджетных средств на ремонт сухопутных путей сообщения, которые можно перенаправить на другие нужды, например, развитие инновационных комбинированных (интер- и мультимодальных) систем и других прорывных транспортных технологий.

Ключевой вывод модели: развитие скоростных пассажирских перевозок работает как «экономический катализатор»: бюджетные субсидии на перевозки и инфраструктуру возвращаются в экономику в виде роста налогов от туризма, загрузки промышленности и экономии на содержании инфраструктуры смежных видов транспорта. При этом, важной практической задачей является развитие маршрутной сети [12,13]. Таким образом, возникают обоснованные предпосылки к смене парадигмы пространственного развития транспортной системы России от

превалирования сухопутных видов транспорта к сбалансированному развитию на принципах бюджетной эффективности.

При этом должен быть сформирован кластер инновационных скоростных пассажирских перевозок, модель которого показана на рис.3. Ядром кластера выступает маршрутная сеть и операторы скоростного пассажирского флота (судоходные компании), обеспечивающие непосредственное предоставление инновационной транспортной услуги. Вокруг ядра формируются три концентрических круга обеспечивающих и сервисных сегментов, связанных между собой потоками товаров, услуг, информации и инвестиций. Ядро задает «ритм» работы всего кластера: от расписания рейсов зависит график работы причалов, загрузка гостиниц, потребность в топливе и снабжении, интенсивность использования судоремонтных мощностей.

Ключевыми функциями ядра кластера, по мнению авторов настоящей статьи, должны вступать:

– Организация регулярных и туристических рейсов.

– Формирование маршрутной сети (региональной и межрегиональной).

– Взаимодействие с государством по вопросам субсидирования.

– Управление пассажиропотоком, билетными системами, сервисом на борту.

– Координация с обеспечивающими сегментами (расписания, стыковки, снабжение).

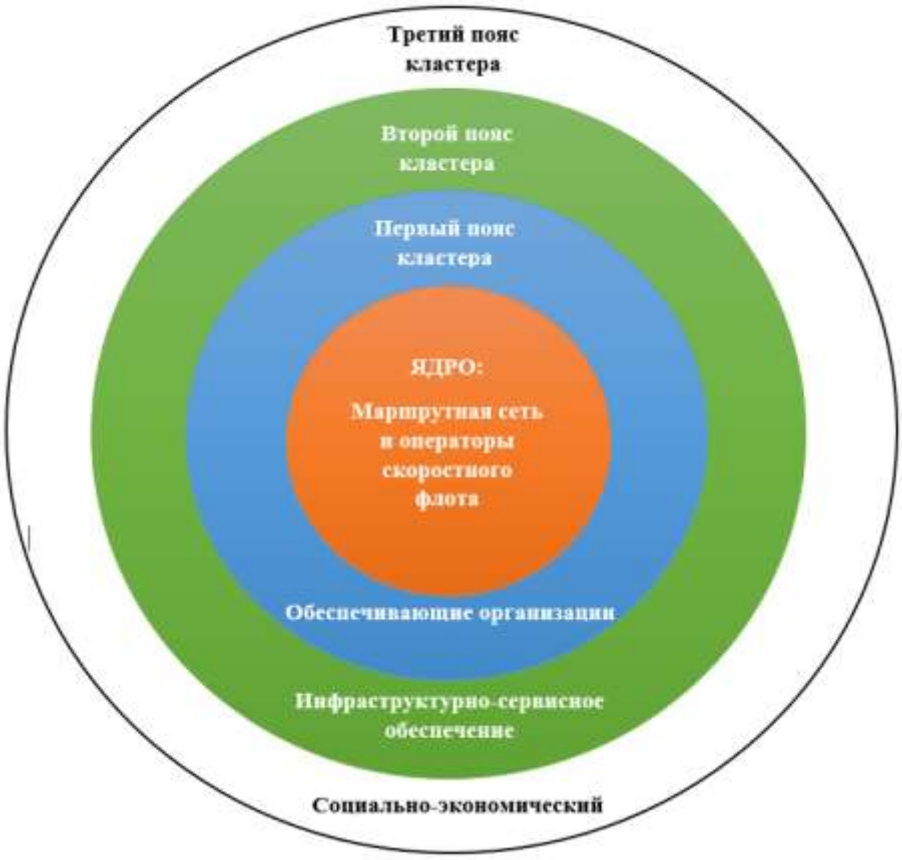


Рис. 3. Концептуальная модель кластера инновационных скоростных пассажирских перевозок

Далее ядро опоясывает пул организаций, реализующих непосредственное обеспечение деятельности ядра, то есть физическую возможность эксплуатации флота (Первый пояс):

– Судостроительные заводы и ремонтные верфи (Зеленодольский завод им. А.М. Горького, ЦКБ по СПК им. Р.Е. Алексеева и др.): обеспечивают поставку новых судов, модернизацию существующего флота, гарантийное и сервисное обслуживание, ремонт и хранения судов в межнавигационный период.

– Поставщики комплектующих: производители двигателей (ММС, «Звезда»), судовых систем навигации, топливной аппаратуры, электроники (например, «Элара», «ВНИИР», МРС Электроникс и др.), производители кресел, материалов.

– Предприятия обеспечения производственного цикла верфей и ремонтных предприятий.

– Топливно-энергетический комплекс: поставщики судового топлива, бункеровочные компании.

– Причальная инфраструктура: речные вокзалы, пассажирские причалы, дебаркадеры, региональные министерства транспорта (владельцы инфраструктуры).

– Образовательные и научно-исследовательские институты (например, базовый вуз ВГУВТ, Нижний Новгород), речные училища, учебные центры подготовки, переподготовки и повышения квалификации плавсостава. Разработка новых типов судов, гидродинамические исследования, инновации в материалах и двигателях.

Второй пояс (инфраструктурно-сервисное обеспечение) включает организации, которые обеспечивают комфорт и безопасность пассажиров, а также создают условия для интеграции водного транспорта в общую транспортную систему, обеспечения мультимодальности («единый билет», стыковка расписаний), привлечение транзитных пассажиров. Данный сегмент кластера обеспечивает взаимосвязь с ядром и первым поясом посредством:

– Транспортно-логистических узлов: железнодорожные вокзалы, автовокзалы, аэропорты, расположенные вблизи речных вокзалов.

– Цифровых платформ, включающих билетные системы, агрегаторы билетов, IT-компании, разработчики систем бронирования и продажа билетов, управление спросом, сбор данных о пассажиропотоке и т.п.

– Страховые компании: страховщики транспортных рисков, пассажиров, судов, ответственности перевозчика.

– Третий пояс (социально-экономический) представляет собой сегмент кластера, который включает предприятия и организации, извлекающие выгоду от деятельности ядра кластера, создавая добавочную стоимость и формируя обратные связи, усиливающие кластер:

– Туристические компании: туроператоры и агентства (внутренний водный туризм), экскурсионные бюро, агентства по приему туристов. Ядро обеспечивает транспортную доступность туристических объектов, а деятельность туристических операторов и агентств направлена на формирование новых туристических пакетов, организацию экскурсий, бронирование групповых рейсов и т.д.

– Гостиничный бизнес и HoReCa (отели, хостелы, гостевые дома, рестораны, кафе, придорожный сервис в портовых городах) принимают

пассажиров (деловых туристов, туристов выходного дня), получают рост загрузки благодаря притоку посетителей, поступающих по водным речным магистралям.

– Торговые компании и ритейл: магазины сувениров, продуктовые рынки, торговые центры в зоне причалов, локальные производители (фермеры, ремесленники). Их деятельность направлена на реализацию товаров пассажирам и туристам. Для малых городов это новый канал сбыта локальной продукции.

– Объекты культурного наследия и музеи: музеи-заповедники (например, Свияжск, Городец), усадьбы, исторические центры. Этот сегмент кластера получает рост посещаемости за счет увеличения транспортной доступности. Возможна реализация совместных маркетинговых программ с ядром.

– Девелоперы и строительные компании: застройщики прибрежных территорий, компании по реновации набережных, девелоперы туристических кластеров. Этот сегмент создаёт коммерческую и жилую недвижимость в зонах, ставших привлекательными благодаря повысившейся транспортной доступности.

Внешний пояс составляют федеральные, региональные и муниципальные органы власти: министерства транспорта, туризма, экономического развития, администрации портовых городов. Этот сегмент обеспечивает регулирование, субсидирование, разработку стратегий развития, создание особых экономических зон туристско-рекреационного типа и т.п.

Таким образом, кластер инновационных скоростных пассажирских перевозок – это территориально-отраслевое объединение взаимосвязанных предприятий и организаций, сосредоточенных вокруг единого профильного ядра, деятельность которых синергетически усиливает конкурентные преимущества каждого участника. Внешней средой кластера выступает государство законодательство и нормативное регулирование, субсидии, федеральные программы развития внутреннего водного транспорта, концепции и проекты (например, «Речные магистрали»).

Обсуждение

Эффекты от функционирования кластера:

1) Синергетический: снижение транзакционных издержек за счет географической концентрации и долгосрочных контрактов между ядром и обеспечивающими сегментами.
2) Мультипликативный [10]: 1 рубль субсидий на перевозки генерирует 3-4 рубля выручки в туризме, гостеприимстве, общественном питании и торговле.
3) Инновационный: концентрация НИОКР и производственных мощностей создает условия для разработки новых поколений судов (водородные, электрические, композитные).
4) Имиджевый: регионы с развитым скоростным флотом получают конкурентное преимущество в борьбе за туристов и инвесторов.
5) Социальный: повышение транспортной доступности малых городов, сокращение социального неравенства, повышение благосостояния населения приречных регионов.

Условиями устойчивого развития кластера выступают:

1) Стабильное государственное субсидирование социально-значимых маршрутов на федеральном и региональном уровнях.
2) Развитие водно-инфраструктурного каркаса – развитие программы судостроения инновационного скоростного флота, гарантированные

глубины на магистральных водных путях и развитие причальной инфраструктуры.

3) Интеграция в мультимодальные системы – создание транспортно-пересадочных узлов (ТПУ) на стыке река-ж/д-авто.
4) Кадровое и научное обеспечение – подготовка плавсостава и инженерных кадров (развитие ВГУВТ и филиалов), НИОКР.
5) Цифровизация – единые билетные платформы, системы управления пассажиропотоком, навигационные сервисы.

Несмотря на позитивную динамику, отрасль сталкивается с вызовами. Главный из них — недофинансирование содержания внутренних водных путей. В 2025 году Росморречфлот получил лишь 72% от нормативно необходимого объема средств на эти цели, что создает риски для безопасности судоходства и требует экстренного перераспределения бюджетов. Второй вызов — сезонность навигации, хотя появление судов на воздушной подушке (как у компании ООО «Водолёт») частично решать проблему зимних перевозок, но только «поперёк реки» или на коротких дистанциях. В этой части необходимо дальнейшее развитие проектов скоростных судов и транспортных технологий, влияющих на экономическую устойчивость [14] операторов скоростного флота, выступающих ядром представленного в настоящей статье кластера.

Ключевыми проблемами проекта «Речные магистрали» выступают:

– высокая строительная стоимость судов, доля которых доходит до 40% себестоимости [15] при невысокой покупательской способности населения;

– ограничения по объемам субсидирования перевозчиков и причальной инфраструктуры, вызванные позицией Минфина РФ о возмещении только операционных расходов перевозчиков без учета специфики речного транспорта (сезонность, перенос ремонтов в межнавигационный период и т.п.) и проблем с состоянием пассажирских причалов;

– недостаточная осведомлённость населения приречных регионов о новых скоростных маршрутах;

– отсрочка утверждения Проекта решения о субсидировании перевозок, разработанной ВГУВТ, позволяющей существенно упростить процедуру отчетности перевозчикам и как следствие нежелание судоходных компаний включаться в проект.

Заключение

Инновационная услуга скоростных пассажирских перевозок судами на подводных крыльях доказала свою эффективность как катализатор экономического роста приречных территорий. На примере регионов Поволжья видно, что проект «Речные магистрали» решает комплекс взаимоувязанных задач: повышает качество жизни и мобильность населения, раскрывает туристический потенциал глубинки, обеспечивает заказами высокотехнологичную промышленность и снижает нагрузку на сухопутную путевую инфраструктуру. Дальнейшее развитие отрасли требует стабильного финансирования содержания водных путей и синхронизации планов судоходных компаний с региональными стратегиями развития туризма. Также требуют особого внимания и другие инновационные виды скоростного пассажирского флота, чтобы в долгосрочной перспективе именно реки становились транспортными артериями, связывающими регионы России, а речные магистрали стали основой пространственного развития страны.

Кластерная модель инновационных скоростных пассажирских перевозок представляет собой многоуровневую систему, в которой ядро (операторы флота) выступает центром притяжения и координации. Вокруг него формируются три пояса: обеспечивающий (верфи, ремонт, комплектующие, топливо), инфраструктурно-сервисный (мультимодальность, IT, кадры, наука) и рыночно-сервисный (туризм, гостиницы, торговля, культура). Устойчивость кластера обеспечивается государственной поддержкой, развитием инфраструктуры и синергией между участниками, что позволяет преобразовывать бюджетные субсидии в мультипликативный рост региональной экономики.

Список литературы

1. Дрейбанд, Д. В. Развитие инфраструктуры внутреннего водного транспорта: стратегические задачи, проблемы и перспективы / Д. В. Дрейбанд, Д. А. Коршунов, А. О. Ничипорук // Научные проблемы водного транспорта. – 2023. – № 74. – С. 96-104. – DOI 10.37890/jwt.vi74.347. – EDN DVCSTQ.
2. Каневская, П. От реки до океана. Как развитие «водной» инфраструктуры влияет на экономику России / П. Каневская // Lenta.RU. — 2025. — 6 октября.
3. Евгений Люлин: «Нижегородская область стала флагманом развития речных перевозок в России» // Знамя-Тонкино. — 2024. — 13 декабря.
4. Чувашия и Татарстан объединяют усилия для развития речного туризма и скоростных перевозок // Медиапалуба. — 2025. — 17 сентября.
5. Эксперты ВГУВТ обосновали 18 межрегиональных маршрутов для проекта «Речные магистрали» // Sudostroenie.info. — 2025. — 3 октября.
6. Скорость — пассажирам, субсидии — судовладельцам // Флагман-ньюс. — 2025. — 4 ноября.
7. Ларионова, Т. Маршрут возможностей / Т. Ларионова // Транспорт России. — 2023. — № 42.
8. Выплыли. Как алтайские речные грузоперевозки ежегодно бьют рекорды // Алтапресс. — 2024. — 2 декабря.
9. Реки устремились в «коридоры» // ПортНьюс. — 2025. — №3 (Август).
10. Методика оценки мультипликативного эффекта развития скоростных пассажирских перевозок на внутреннем водном транспорте РФ / В. Н. Костров, А. П. Бафанов, Д. А. Коршунов, А. А. Белова // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2026. – № 5. – С. 52-59. – DOI 10.36535/0236-1914-2026-05-9. – EDN JIVLCU.
11. Коршунов, Д. А. Государственная поддержка и управление развитием межрегиональных скоростных пассажирских перевозок на внутреннем водном транспорте / Д. А. Коршунов, А. П. Бафанов // Актуальные проблемы пространственного развития : Материалы II Международной научно-практической конференции, Нижний Новгород, 24 октября 2025 года. – Нижний Новгород: Нижегородский институт путей сообщения, 2025. – С. 585-590. – EDN IYDBHM.
12. Иванова, Ж. Ю. Экономико-математическая модель формирования маршрутной сети речных пассажирских перевозок / Ж. Ю. Иванова, О. Л. Домнина, В. Н. Костров // Транспортное дело России. – 2025. – № 1. – С. 9-12. – EDN DGGUUL.
13. Методика обоснования маршрутов скоростных межрегиональных пассажирских перевозок по внутренним водным путям / А. О. Ничипорук, Н. С. Итальянцев, И. К. Кузьмичев, В. И. Тихонов // Морские интеллектуальные технологии. – 2025. – № 3-3(69). – С. 109-116. – DOI 10.37220/MIT.2025.69.3.062. – EDN KQEDRK.
14. Костров, В. Н. Методические аспекты анализа и оценки уровня экономической устойчивости оператора инновационных комбинированных пассажирских перевозок / В. Н. Костров, А. П. Бафанов // Вестник УГНТУ. Наука, образование, экономика. Серия: Экономика. – 2023. – № 4(46). – С. 64-71. – DOI 10.17122/2541-8904-2023-4-46-64-71. – EDN HAJMEA.

References

1. Drejband, D. V. Razvitie infrastruktury vnutrenneskie zadachi, problemy i perspektivy go vodnogo transporta: strategiche/ D. V. Drejband, D. A. Korshunov, A. O. Nichiporuk //

Nauchnye problemy vodnogo transporta. – 2023. – № 74. – S. 96-104. – DOI 10.37890/jwt.vi74.347. – EDN DVCSTQ.
2. Kanevskaya, P. Ot reki do okeana. Kak razvitie «vodnoj» infrastruktury vliyaet na ekonomiku Rossii / P. Kanevskaya // Lenta.RU. — 2025. — 6 oktyabrya.
3. Evgenij Lyulin: «Nizhegorodskaya oblast' stala flagmanom razvitiya rechnyh perevozok v Rossii» // Znamya-Tonkino. — 2024. — 13 dekabrya.
4. Chuvashiya i Tatarstan ob»edinyayut usiliya dlya razvitiya rechnogo turizma i skorostnyh perevozok // Mediapaluba. — 2025. — 17 sentyabrya.
5. Eksperty VGUVT obosnovali 18 mezhregional'nyh marshrutov dlya proekta «Rechnye magistrali» // Sudostroenie.info. — 2025. — 3 oktyabrya.
6. Skorost' — passazhiram, subsidii — sudovladel'cam // Flagman-n'yus.—2025. — 4 noyabrya.
7. Larionova, T. Marshrut vozmozhnostej / T. Larionova // Transport Rossii.— 2023.— № 42.
8. Vyplyli. Kak altajskie rechnye gruzoperevozki ezhegodno b'yut rekordy // Altapress. — 2024. — 2 dekabrya.
9. Reki ustremilis' v «koridory» // PortN'yus. — 2025. — №3 (Avgust).
10. Metodika ocenki mul'tiplikativnogo effekta razvitiya skorostnyh passazhirskih perevozok na vnutrennem vodnom transporte RF / V. N. Kostrov, A. P. Bafanov, D. A. Korshunov, A. A. Belova // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyj informacionnyj sbornik. – 2026. – № 5. – S. 52-59. – DOI 10.36535/0236-1914-2026-05-9. – EDN JIVLCU.
11. Korshunov, D. A. Gosudarstvennaya podderzhka i upravlenie razvitiem mezhregional'nyh skorostnyh passazhirskih perevozok na vnutrennem vodnom transporte / D. A. Korshunov, A. P. Bafanov // Aktual'nye problemy prostranstvennogo razvitiya : Materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, Nizhnij Novgorod, 24 oktyabrya 2025 goda. – Nizhnij Novgorod: Nizhegorodskij institut putej soobshcheniya, 2025. – S. 585-590. – EDN IYDBHM.
12. Ivanova, Zh. Yu. Ekonomiko-matematicheskaya model' formirovaniya marshrutnoj seti rechnyh passazhirskih perevozok / Zh. Yu. Ivanova, O. L. Domnina, V. N. Kostrov // Transportnoe delo Rossii. – 2025. – № 1. – S. 9-12. – EDN DGGUUL.
13. Metodika obosnovaniya marshrutov skorostnyh mezhregional'nyh passazhirskih perevozok po vnutrennim vodnym putyam / A. O. Nichiporuk, N. S. Ital'yancev, I. K. Kuz'michev, V. I. Tihonov // Morskie intellektual'nye tekhnologii. – 2025. – № 3-3(69). – S. 109-116. – DOI 10.37220/MIT.2025.69.3.062. – EDN KQEDRK.
14. Kostrov, V. N. Metodicheskie aspekty analiza i ocenki urovnya ekonomicheskoj ustojchivosti operatora innovacionnyh kombinirovannyh passazhirskih perevozok / V. N. Kostrov, A. P. Bafanov // Vestnik UGNTU. Nauka, obrazovanie, ekonomika. Seriya: Ekonomika. – 2023. – № 4(46). – S. 64-71. – DOI 10.17122/2541-8904-2023-4-46-64-71. – EDN HAJMEA.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Коршунов Дмитрий Александрович, к.э.н., доцент, доцент кафедры логистики и маркетинга, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603950, г.Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: voi82@yandex.ru

Dmitry A. Korshunov, PhD, Associate professor of the Department of Logistics and Marketing, Volga State University of Water transport, 5, Nesterov st. Nizhny Novgorod, 603950

Бафанов Артём Павлович, соискатель учёной степени, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603950, г.Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail:

Artem P. Bafanov, PhD candidate,Volga State University of Water transport, 5, Nesterov st. Nizhny Novgorod, 603950

Статья поступила в редакцию 25.03.2026; принята к публикации 30.05.2026; опубликована онлайн 20.09.2026. Received 25.03.2026; published online 20.09.2026.

УДК 378.141
DOI: 10.37890/jwt.vi88.746

Платный прием в транспортные вузы в 2026 году: новые правила и возможные последствия

В.В. Крайнова
ORCID: 0000-0001-7960-3661
Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В статье анализируются изменения в правилах платного приёма, которые вступили в силу в приёмную кампанию 2026 года и затронули в том числе транспортные вузы Росморречфлота. Автор дает системное представление о том, как новые правила меняют ландшафт платного приёма в транспортной сфере, и рассматривает возможные сценарии и последствия для абитуриентов, вузов и рынка труда в ближайшие годы. Выявлены недостатки существующей методики расчёта предельного количества мест: неоднозначность понятия «профильность», сложность верификации некоторых показателей, отсутствие учета кадровой потребности на уровне отрасли, региона. Автор обращает внимание на важное условие ограничения платного приема будущих специалистов юридического и экономического профиля— сбалансировать подготовку кадров с реальными потребностями транспортной отрасли и избежать как перенасыщения отраслевого рынка труда, так и ослабление кадрового потенциала транспортной отрасли.

Ключевые слова: высшее образование, транспортные вузы, платный прием, правила приема, кадровая потребность, подготовка юристов и экономистов, повышение качества образования

Paid admission to transport universities in 2026: new rules and possible consequences

Vera V. Krainova
ORCID: 0000-0001-7960-3661
Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. This article analyzes the changes to the fee-based admissions rules that came into effect for the 2026 admissions campaign, including those affecting Rosmorrechflot's transport universities. The author provides a systematic overview of how the new rules are changing the landscape of fee-based admissions in the transport sector and examines possible scenarios and implications for applicants, universities, and the labor market in the coming years. The article identifies shortcomings in the current methodology for calculating the maximum number of places: the ambiguity of the concept of «specialization,» the difficulty in verifying certain indicators, and the failure to consider personnel needs at the industry and regional levels. The author draws attention to an important condition for limiting the fee-based admission of future specialists in legal and economic fields: balancing personnel training with the actual needs of the transport industry and avoiding both oversaturation of the industry labor market and a weakening of the transport industry's human resources potential.

Keywords: higher education, transport universities, fee-based admissions, admissions rules, personnel needs, training lawyers and economists, improving the quality of education

Введение

В 2026 году приёмная кампания в вузах отличалась рядом изменений — ключевые из них затронули сферу платного приёма. Отправной точкой для государственного регулирования платного приёма стал май 2025 года: тогда в статью 101 Федерального закона от 29.12.2012 № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации» добавили новую норму. Она наделила Правительство РФ правом утверждать: перечень направлений и специальностей, для которых устанавливается лимит платных мест; порядок и сроки определения этого лимита.

Цель нововведений — улучшить качество высшего образования и сбалансировать ситуацию на рынке труда: устранить переизбыток специалистов по отдельным направлениям и одновременно восполнить нехватку кадров среднего звена и рабочих профессий.

«Процесс подготовки кадров для транспортной отрасли является основой кадрового и инновационного развития транспортной системы Российской Федерации - одной из базовых отраслей экономики государства, формирующей более 6 % национального внутреннего валового продукта» [1].

Подготовка специалистов для транспортного комплекса ведется в рамках 17 укрупненных групп специальностей и направлений подготовки среднего профессионального и высшего образования, в том числе по УГСН 38.00.00 «Экономика и управление» и 40.00.00 «Юриспруденция».

Система транспортного образования, подведомственная Минтрансу России и находящимся в его ведении федеральным агентствам, включает 17 образовательных организаций высшего образования, в том числе 6 – вузов водного транспорта, подведомственных Росморречфлоту.

В условиях ограничения платного приема транспортные вузы Росморречфлота столкнулись с новыми вызовами и жесткими ограничениями со стороны государства. Вслед за ограничениями бюджетного приема в начале 2000-ых гг. на ряд направлений подготовки/специальностей УГСН 38.00.00 «Экономика и управление» и 40.00.00 «Юриспруденция», начиная с приема 2026 года – ограничивается и платный прием.

Вопросы платного высшего образования активно изучают в российской научной среде, они нашли свое отражение в ряде современных научных исследований [2-10]. Авторы исследований затрагивают различные проблемные аспекты платного образования: стоимость платных образовательных услуг [3,6], качество платного образования [2,5,7], его доступность и востребованность [4,7,8,10], отсутствие эффективного механизма согласования потребностей рынка труда с подготовкой выпускников [7,8], проблемы финансирования высшего образования в современной России [9].

В научной повестке, связанной с экономикой образования и проблематикой платного приема, недостаточно внимания уделяется государственному регулированию этой сферы — хотя именно с 2026 года оно стало значимым фактором. В рамках данного исследования мы рассмотрим действующие ограничения, которые впервые были реализованы в ходе конкурсной процедуры и приемной кампании 2026 года, их возможные последствия.

Методы

Эмпирическую базу составили официальные статистические данные Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Единой межведомственной информационно-статистической системы (ЕМИСС).

Методами исследования являлись: анализ российских научных публикаций по выбранной тематике; системный подход; логико-структурный подход, наблюдение, сравнение, обобщение.

Результаты, обсуждения

Предвестником установленных Законом ограничений, вступивших в силу с 01.09.2025, стало ограничение в приемную кампанию 2025 года на увеличение платных мест в ходе приемной кампании, которое вузы ранее свободно производили при повышенном спросе.

Акты законодательства о платном приеме на обучение в вузы на 2026-2027 учебный год представлены на рисунке 1 в хронологии их принятия.

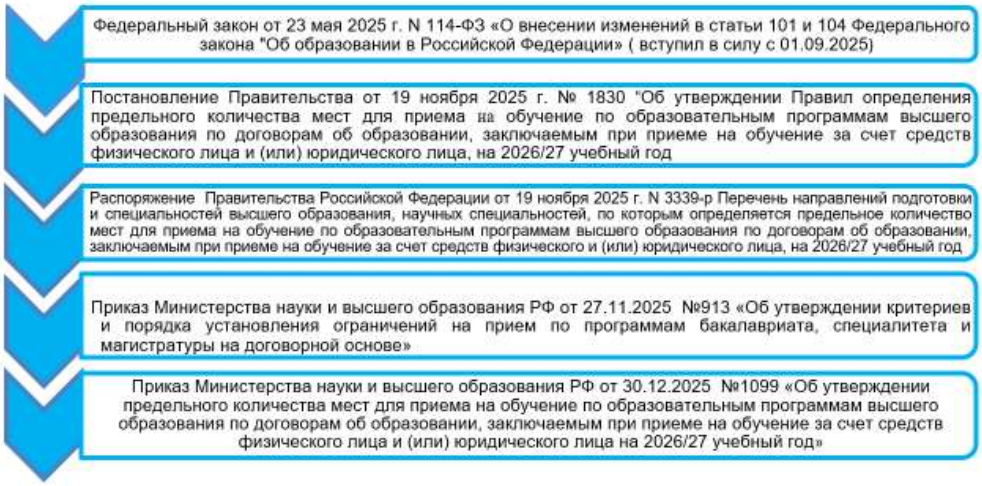


Рис. 1. Законодательное регулирование нового механизма платного приема в вузы

Налицо - стремительный характер их разработки и ввода в действие [13-16]:

– 19.11.2025. Правительство РФ весьма скоропалительно и без широкой общественной и профессиональной дискуссии ввело новые правила квотирования платных мест в вузах и приняло Постановление от 19 ноября 2025 г. № 1830 “Об утверждении Правил определения предельного количества мест для приема на обучение по образовательным программам высшего образования по договорам об образовании, заключаемым при приеме на обучение за счет средств физического лица и (или) юридического лица, на 2026/27 учебный год” и распоряжение от этой же даты № 3339, определяющее перечень направлений Перечень направлений подготовки и специальностей высшего образования, научных специальностей, по которым определяется предельное количество мест.

– 27.11.2025 Минобрнауки России утверждены критерии и порядок установления ограничений на прием по программам бакалавриата, специалитета и магистратуры на договорной основе»

– 30.12.2025 Минобрнауки России утверждено предельное количество платных мест вузам.

Платное обучение стало частью российской системы высшего образования в 1990-х годах — его появление было связано с модернизацией вузовской системы. Сейчас договорные места представлены в каждом вузе страны. Согласно данным мониторинга системы высшего образования за 2025 год (см. рис. 2), доля студентов, обучающихся на платной основе, превышает половину — она составляет 52 %.

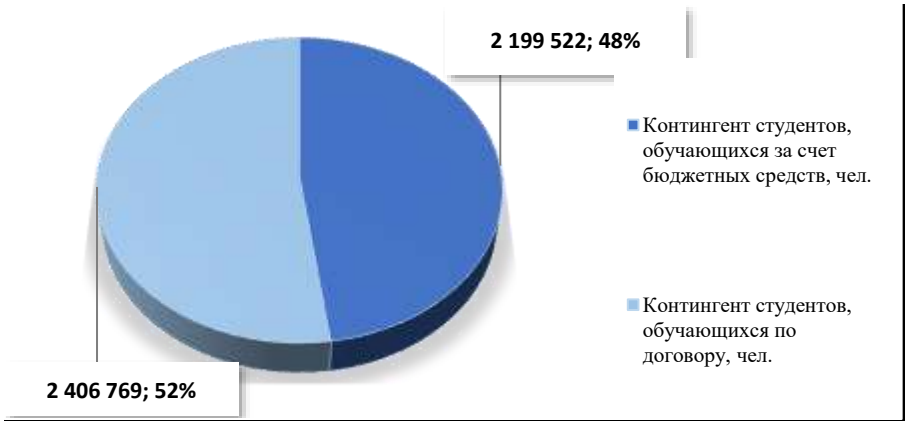


Рис. 2. Контингент студентов, обучающихся по программам высшего образования (по данным мониторинга системы высшего образования РФ – 2025, https://monitoring.miccedu.ru/)

Самые популярные направления платного образования по данным Минобрнауки (рис.3) — это УГСН 38.00.00 и 40.00.00: Юриспруденция (бакалавриат и магистратура) – почти 15% от платного приема, на втором месте - Экономика, Менеджмент –по 7–8 %).

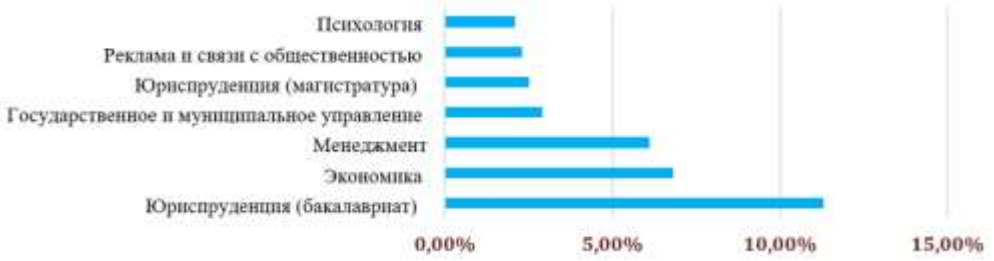


Рис. 3. Основные направления платного обучения в вузах РФ (по данным Минобрнауки России)

Основные направления платного обучения соответствуют области знаний «Науки об обществе», которая в структуре имеет примерно равный удельный вес с областью знаний «Инженерное дело, технологии и технические науки» (рис. 4).

По данным мониторинга системы высшего образования РФ-2025 в вузах Росморречфлота на договорной основе обучается в среднем 36% от общего контингента студентов.

В 2026 году Минобрнауки России сократило 47 000 платных мест в вузах — 13% от их общего числа.

Регулирование платного приёма в 2026/27 учебном году реализуется в пилотном формате — он охватывает программы бакалавриата и специалитета по 40 направлениям и специальностям (28 направлений бакалавриата и 12 специальностей) и распространяется на все образовательные организации (см. рис. 5).



Рис. 4. Распределение обучающихся по программам высшего образования по областям образования (по данным мониторинга системы высшего образования РФ-2025, https://monitoring.miccedu.ru/ https://monitoring.miccedu.ru/)

Согласно данным рисунка 5, в 2026 году произошло сокращение платных мест по ряду направлений. В их числе:

– экономика и управление (экономика, менеджмент, управление персоналом, государственное и муниципальное управление, бизнес-информатика, торговое дело, товароведение);

– юриспруденция (юриспруденция, правовое обеспечение национальной безопасности, судебная и прокурорская деятельность, правоохранительная деятельность, судебная экспертиза, таможенное дело);

– гуманитарные и социальные науки (журналистика, реклама и связи с общественностью, международные отношения, филология, лингвистика, психология, конфликтология, зарубежное регионоведение);

– сфера услуг и медиа (дизайн архитектурной среды, медиакоммуникации, телевидение, сервис, издательское дело, публичная политика и социальные науки).

Особого внимания заслуживает включение в перечень таких, на первый взгляд, востребованных специальностей, как стоматология, нефтегазовое дело и горное дело — этот факт стал неожиданностью для экспертов в сфере образования. Таким образом, реформа охватывает обширный массив образовательных программ, что свидетельствует о системном подходе государства к регулированию платного приёма.

В первую очередь сокращение коснулось трёх самых популярных среди коммерческих студентов направлений подготовки (рис.3): Юриспруденция - сократили 13,9 тыс. мест (–17,9% по сравнению с 2025 годом), Менеджмент — 7,4 тыс. мест (–17,1%), Экономика— 7,3 тыс. мест (–15,6%).

На рис.5 выделены программы подготовки/специальности, которые попали в перечень и реализуются отраслевыми вузами Росморречфлота по УГСН 38.00.00 «Экономика и управление» и 40.00.00 «Юриспруденция».

Код	Название направления подготовки бакалавриата	Код	Название специальности
07.03.01	Архитектура	20.05.01	Пожарная безопасность
07.03.03	Дизайн архитектурной среды	21.05.04	Горное дело
15.03.05	Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных	21.05.06	Нефтегазовые техника и технологии
21.03.01	Нефтегазовое дело	31.05.03	Стоматология
37.03.01	Психология	37.05.02	Психология служебной деятельности
37.03.02	Конфликтология	38.05.01	Экономическая безопасность
38.03.01	Экономика	38.05.02	Таможенное дело
38.03.02	Менеджмент	40.05.01	Правовое обеспечение национальной безопасности
38.03.03	Управление персоналом	40.05.02	Правоохранительная деятельность
38.03.04	Государственное и муниципальное управление	40.05.03	Судебная экспертиза
38.03.05	Бизнес-информатика	40.05.04	Судебная и прокурорская деятельность
38.03.06	Торговое дело	45.05.01	Перевод и переводоведение
38.03.07	Товароведение		
38.03.10	Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура		
40.03.01	Юриспруденция		
41.03.01	Зарубежное регионоведение		
41.03.05	Международные отношения		
41.03.06	Публичная политика и социальные науки		
42.03.01	Реклама и связи с общественностью		
42.03.02	Журналистика		
42.03.03	Издательское дело		
42.03.04	Телевидение		
42.03.05	Медиакоммуникации		
43.03.01	Сервис		
45.03.01	Филология		
45.03.02	Лингвистика		
45.03.03	Фундаментальная и прикладная лингвистика		
47.03.02	Прикладная этика		

Рис.5. Перечень направлений подготовки/специальностей высшего образования, по которым на 2026/2027 учебный год устанавливается предельное количество платных мест

В вузах Росморречфлота сформирован значительный контингент обучающихся по укрупнённым группам специальностей/ направлений подготовки 38.00.00 и 40.00.00. Существенное ограничение приёма на платные места по данным направлениям окажет заметное влияние на функционирование транспортных университетов. (табл.1).

Таблица 1

Контингент студентов в вузах Росморречфлота по УГСН 38.00.00 и 40.00.00

Код УГСН	Наименование УГСН	Приведённый контингент студентов по УГСН, чел.	Удельный вес приведенного контингента студентов по УГСН в общем приведённом контингенте студентов образовательной организации (средний уровень ряда)
38.00.00	Экономика и управление	1373,3	9,3%
40.00.00	Юриспруденция	1252,4	9,7%
Итого		2625,7	19%

Составлена автором по данным мониторинга системы высшего образования РФ - 2025, https://monitoring.miccedu.ru/

Приведенный контингент студентов обучающихся на УГСН 38.00.00 и 40.00.00 составляет более 2,5 тысяч, а удельный вес приведенного контингента в общей приведенной численности занимает порядка 20%. И это, в основной массе, - платный контингент. В связи с этим ограничение платного приёма способно существенно повлиять на финансово-хозяйственную и образовательную деятельность транспортных вузов.

Обратимся к методике расчета предельного количества платных мест – оно определяется по среднему объему платного приема за последние три года с использованием коэффициента, учитывающего удельный вес обучающихся по области образования, к которой относится специальность, к общей численности обучающихся (если более 50% - применяется коэффициент 1,1).

Предельное количество мест будет равно 0, если: в результате расчета количество мест меньше 10 (экономически неэффективно учить такую малую группу), средний балл ЕГЭ – меньше 50.

Повысить предельное количество платных мест может увеличить комплексная балльная оценка: она включает три параметра: средний балл ЕГЭ, востребованность выпускников, выполнение плана платного приема.

Комплексная оценка: $К = Б_{ЕГЭ} + Б_{Т} + Б_{ВП} = 0 + 5 + 2 = 7$.

$Б_{ЕГЭ}$ – балльная оценка среднего балла ЕГЭ

Лица со средним баллом ЕГЭ, прошедшие на обучение по договорам об оказании платных образовательных услуг	$Б_{ЕГЭ}$
ЕГЭ < 55	0
55 ≤ ЕГЭ < 60	1
60 ≤ ЕГЭ < 70	2
70 ≤ ЕГЭ < 85	3
≥ 85	5

$Б_{Т}$ – балльная оценка востребованности выпускников рынка труда

Востребованность выпускников на рынке труда	$Б_{Т}$
<60	0
60 ≤ Т < 70	1
70 ≤ Т < 80	2
≥ 80	5

$Б_{ВП}$ – балльная оценка процентного плана выполнения плана приема обучения по договорам

Процент выполнения плана приема на обучение по договорам об оказании платных образовательных услуг	$Б_{ВП}$
< 80	0
80 ≤ ВП < 90	1
90 ≤ ВП ≤ 100	2

Рис. 6. Расчет комплексной оценки на примере специальности «Экономическая безопасность»

Оценка составила 7 баллов. Согласно методике возможна следующая корректировка предельного количества платных мест: при количестве баллов менее 2 – увеличение на 5%; при количестве баллов от 2 до 6 – увеличение на 10%; при количестве баллов более 6 – увеличение на 15%.

Таким образом, в нашем случае предельное количество мест составило 40х1,15 = 46 мест. (40 – это средний объем платного приема за последние три года). При этом предельное количество не может быть более фактической численности принятых на обучение в приемную кампанию 2025/26 учебного года.

Предельное количество мест можно увеличить независимо от комплексной оценки:

– при приеме за счет юридических лиц (гарантийное письмо от заказчиков с указанием количества таких мест);

– при приеме иностранных граждан и лиц без гражданства.

Образовательным организациям отводилось всего 5 рабочих дней для представления предложений по корректировке платных мест с приложением подтверждающих документов.

Каковы последствия ограничения платного приема для основных участников образовательных отношений: вузов и абитуриентов?

Последствия для вузов

1. В части образовательного портфеля

Методика определения предельного размера платных мест порождает риск потери вузами уникальных и востребованных на рынке труда образовательных программ.

В основе расчёта предельного размера платных мест- статистика трех предшествующих лет. Если в какой-то год был аномально низкий или высокий набор, это исказит базу и приведёт к неадекватному лимиту в будущем. Методика не учитывает быстро меняющийся характер рынок труда, когда направление подготовки/специальность резко набирает спрос из-за появления новых технологий, госпрограмм и т.п. Условие с «обнулением» платных мест при средней численности менее 10 человек может привести к тому, что уникальная программа будет потеряна.

2. В части финансирования деятельности

Для всех вузов, в том числе вузов Росморречфлота такая ситуация негативно скажется на внебюджетных доходах, приведет к их сокращению/потере, в то время как утвержденные нормативные затраты, в размере которых финансируется государственное задание вузов (бюджетный прием), не позволяют надлежащим образом содержать и обновлять материально-техническую базу, в частности не позволяют содержать учебный флот транспортных вузов Росморречфлота, осуществлять обновление устаревшей инфраструктуры. Сокращение поступлений от платной деятельности может привести к сокращению программ развития, снижению качества образовательной и научной деятельности.

Ограничение числа внебюджетных мест приведёт к оптимизации штата — в том числе сокращению преподавателей и вспомогательного персонала. В условиях, когда почти 80 % профессорско-преподавательского состава Волжского университета — учёные с кандидатскими и докторскими степенями, это создаёт угрозу устойчивости работы подразделений и повышает вероятность оттока опытных кадров.

Последствия для абитуриентов

Цель нововведения такова, что ограничения на популярных направлениях перенаправят поток абитуриентов на специальности, в которых сейчас есть дефицит кадров (инженерные, IT, педагогические, медицинские и др.). Для абитуриентов — это шанс поступить на бюджетное место: на таких направлениях конкурс часто ниже, а количество мест остаётся достаточным.

Что касается абитуриентов, поступающих в вузы в 2026 году, они ожидаемо не смогли переориентироваться с преимущественно гуманитарного профиля на инженерно-технические специальности (нужна длительная подготовка, изменения в средней школе). Это подтверждает статистика выбора ЕГЭ выпускниками 2026 года (табл.2).

Как видно из таблицы 2, профильную математику сдавало чуть более 50% выпускников (она необходима для поступления на технические, инженерные специальности), а самым популярным предметом по выбору в 2026 году вновь стало обществознание - его выбрали почти 296,5 тысяч человек — это практически 40 процентов от всех участников ЕГЭ.

Таблица 2

Выбор ЕГЭ выпускниками 2026 года

Предмет ЕГЭ	Уд. вес, %
Русский язык	100
Профильная математика	51
Базовая математика	49
Обществознание	40
Информатика	22
Биология	20
Физика	20
Химия	15
История	13
Английский язык	12
Литература	6
География	4

Таким образом, ключ к решению задачи — в комплексном подходе: ограничить платный приём на отдельные направления, одновременно нарастив целевой приём и запустив профориентационную работу со школьниками. Параллельно государству стоит сфокусировать поддержку педагогического образования на подготовке учителей ключевых для инженерии предметов (информатики, математики, физики). Такой подход обеспечит абитуриентов качественной базой и создаст устойчивый поток мотивированных кандидатов на инженерные направления.

Ситуация, когда количество платных мест жёстко ограничено, повышает конкуренцию. Для тех, кто готов оплачивать обучение, но не прошёл на бюджетное место, это означает снижение шансов на поступление в вуз. Последствием может стать разочарование среди абитуриентов и их родителей: им придётся корректировать планы, искать другие варианты получения образования (поступление в колледж, подготовка к пересдаче ЕГЭ в следующем году), что повлечёт за собой дополнительные расходы и потерю времени.

Когда вузы лишатся части внебюджетного дохода, чтобы закрыть возникшую финансовую брешь, они, с большой вероятностью повысят цены на оставшиеся места. Особенно ярко эта тенденция проявляется в «топовых» вузах — именно туда устремляются самые сильные абитуриенты, и для них рост стоимости обучения становится ощутимым фактором при выборе вуза.

Заключение

Государственное регулирование внебюджетного приёма, будучи продуманным и взвешенным, способно дать системе образования ряд преимуществ — например, сместить акцент на программы, востребованные экономикой, и усилить подготовку кадров. Вместе с тем, как показало исследование, такие меры несут и определённые риски — они могут негативно отразиться как на вузах, так и на поступающих.

На деле строгий регламент в сочетании с отдельными гибкими элементами неизбежно сопряжён с потенциальными проблемами. Поэтому государству как регулятору важно заранее предусматривать меры, которые помогут снизить возможные негативные эффекты, а также вести постоянный мониторинг ситуации и при необходимости корректировать нормативную базу.

На наш взгляд, требуют корректировки критерии и порядок установления ограничений на прием по программам бакалавриата, специалитетами магистратуры на договорной основе, утверждённые Приказ Министерства науки и высшего образования РФ № 913 от 27.11.2025 № 913. Мы выявили следующие недостатки методики:

– неоднозначность понятия «профильности», которое используется при установлении корректирующего коэффициента. Определение, является ли направление профильным для вуза (доля более 50%), — достаточно субъективное решение. Вузы могут по-разному трактовать этот критерий. К слову, Волжский государственный университет водного транспорта готовит кадры экономистов, начиная с 1970 года (более 55 лет), юристов - более 30 лет (с 1994 года). Традиционно экономические, бухгалтерские службы портов, пароходств, судоходных компаний, администраций бассейнов внутренних водных путей Волго-Камского бассейна пополнялись нашими выпускниками экономистами. Юристы востребованы в транспортной прокуратуре, транспортной полиции, следственном комитете на транспорте и т. д. Кроме того, все реализуемые образовательные программы экономического и юридического направления в Волжском университете имеют отраслевую направленность, что подтверждают профили подготовки/наименование образовательной программы. Например, по направлению подготовки 40.03.01 Юриспруденция реализуется образовательная программа «Юрист в сфере транспорта (морского и внутреннего водного), по направлению подготовки 38.03.01 Экономика - «Экономика, финансы и бухгалтерский учет на транспортных предприятиях» и т.п.

– наблюдается сложность сбора данных для комплексной оценки**.** Не все показатели, используемые в ходе комплексной оценки легко собрать и верифицировать, что снижает прозрачность и объективность корректировок (например, статистика трудоустройства);

– методика предполагает увеличение платных мест при приеме за счет юридических лиц (при наличии гарантийных писем от заказчиков с указанием количества таких мест). Однако установленный срок в 5 рабочих дней для предоставления подтверждающих документов изначально делал выполнение этой задачи нереализуемым из-за логистических и временных ограничений.

– методика не учитывает кадровую потребность по отраслям экономики, на уровне региона, где находится вуз. Считаем, что в условиях текущего дисбаланса между предложением образовательных услуг и реальными запросами рынка труда особую актуальность приобретает задача системного учёта кадровой потребности в отраслевом и региональном разрезах с обязательным учетом ее в методике при формировании обоснованных лимитов приёма на платной основе. При определении предельного размера платных мест методика должна опираться на механизм совместного прогнозирования с участием вузов, учредителя, региональных органов власти. Это позволит избежать ситуации избытка или дефицита выпускников по конкретным направлениям.

В Концепции подготовки кадров для транспортного комплекса до 2035 года закреплено: «Транспортные образовательные организации будут обеспечивать квалифицированными кадрами не только основные системообразующие функциональные подразделения транспортных компаний. Также будет вестись

подготовка кадров для сферы транспортной логистики, экономики, управления, права и других направлений профессиональной транспортной деятельности» [1].

Таким образом, возникает задача сохранения баланса: с одной стороны, ограничения платного приёма на экономические и юридические направления призваны скорректировать переизбыток выпускников на общем рынке труда, с другой — нельзя допустить ослабления кадрового потенциала самой транспортной отрасли. Ведь именно транспортные вузы, согласно Концепции подготовки кадров до 2035 года, призваны целенаправленно готовить специалистов для смежных сфер — экономики и права.

Следовательно, при формировании контрольных цифр приёма необходимо учитывать отраслевой спрос: точечно поддерживать профильные программы для транспортного комплекса, одновременно регулируя общий поток по этим направлениям, чтобы избежать как локального дефицита, так и макроэкономического перепроизводства кадров.

Список литературы

1. Концепция подготовки кадров для транспортного комплекса до 2035 года (утверждена распоряжением Правительства РФ от 06.02.2021 №255-р).
2. Жандарова Л.Ф. Предпосылки и тенденции развития региональных рынков платных образовательных услуг в системе высшего профессионального образования//Современные проблемы науки и образования-2015.-№1-1.-С. 690.
3. Лапшина О. И., Астраханцева И.А. Влияние стоимости платных образовательных услуг на качество финансового менеджмента в системе высшего образования // Сборник научных трудов ВУЗов России Проблемы экономики, финансов и управление производством. -2018.-№43.-С. 76-81.
4. Лезина О.В., Терновая Л.О. Платное высшее образование: инвестиция в будущее страны или вклад в усиления социального неравенства // Казачество. –2025.-№86 (5). – С. 131-139.
5. Нанавян А.М., Рыбакова И.С. Проблемы оценки качества высшего образования и динамика приема и выпуска в вузах в регионах России // Региональная экономика и управление: электронный научный журнал. -2025.-№2 (82).
6. Осипова Т. Ю., Тарасова А. Е. Сравнительный анализ стоимости реализации образовательных программ высшего образования //Сибирская финансовая школа. - 2025.-№1 (157). - С. 119-127.
7. Панфилова Е.В., Зайцев В.Ф. Коммерческое образование в вузах России: оценка доступности и востребованности, Современные исследования социальных проблем, 2023 г., № 4, стр. 112-123.
8. Попова Е.С. «Образование второго шанса» и альтернативные траектории как механизм накопления человеческого капитала // Образование и наука в России: состояние и потенциал развития. 2019. № 4. С. 372-387.
9. Титов С.Р. Платные образовательные услуги и бюджетное финансирование государственных учреждений высшего образования: взаимосвязь и вопросы привлечения средств // Вестник Академии знаний. -2020.-№36 (1). -С. 340-347.
10. Халимбеков Х.З., Фастовец И.П., Магомедова Ф.И. Анализ национального и регионального рынка платных услуг в системе высшего и среднего профессионального образования // Вестник Забайкальского государственного университета. -2018.-№10.-С. 128-126.
11. Кузьмичев И.К. Обеспечение качества транспортного образования: современные вызовы и перспективы/ И.К. Кузьмичев, В.В. Крайнова//Научные проблемы водного транспорта. 2025. № 83. С. 124-137.
12. Лаврентьева Е.А. Правовое регулирование независимой оценки квалификации работников водного транспорта/ Е.А. Лаврентьева, А.В. Некрасов// Транспортное дело России. 2023. № 5. С. 198-203.
13. Постановление Правительства от 19 ноября 2025 г. № 1830 “Об утверждении Правил определения предельного количества мест для приема на обучение по образовательным программам высшего образования по договорам об образовании,

заключаемым при приеме на обучение за счет средств физического лица и (или) юридического лица, на 2026/27 учебный год
14. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 19 ноября 2025 г. N 3339-р Перечень направлений подготовки и специальностей высшего образования, научных специальностей, по которым определяется предельное количество мест для приема на обучение по образовательным программам высшего образования по договорам об образовании, заключаемым при приеме на обучение за счет средств физического и (или) юридического лица, на 2026/27 учебный год
15. Приказ Министерства науки и высшего образования РФ № 913 от 27.11.2025 «Об утверждении критериев и порядка установления ограничений на прием по программам бакалавриата, специалитета и магистратуры на договорной основе»
16. Приказ Министерства науки и высшего образования РФ №1099 от 30.12.2025 «Об утверждении предельного количества мест для приема на обучение по образовательным программам высшего образования по договорам об образовании, заключаемым при приеме на обучение за счет средств физического лица и (или) юридического лица на 2026/27 учебный год»

References

1. The Concept for Training Personnel for the Transport Complex until 2035 (approved by RF Government Order of 06.02.2021 No. 255-r).
2. L. F. Zhandarova. Prerequisites and Trends in the Development of Regional Markets of Paid Educational Services in the System of Higher Professional Education//Modern Problems of Science and Education-2015.-№1-1.-P. 690.
3. O. I. Lapshina, I. A. Astrakhantseva. The Impact of the Cost of Paid Educational Services on the Quality of Financial Management in the Higher Education System // Collection of Scientific Papers of Russian Universities Problems of Economics, Finance and Production Management. -2018.-№43.-P. 76-81.
4. O. V. Lezina, L. O. Ternovaya. Paid Higher Education: An Investment in the Country's Future or a Contribution to Strengthening Social Inequality // Cossacks. –2025.-№86 (5). –P. 131-139.
5. Nanavyan A.M., Rybakova I.S. Problems of assessing the quality of higher education and the dynamics of admission and graduation at universities in the regions of Russia // Regional Economics and Management: electronic scientific journal. -2025.-№2 (82).
6. Osipova T. Yu., Tarasova A.E. Comparative analysis of the cost of implementing educational programs of higher education // Siberian financial school. -2025.-№1 (157). - P. 119-127.
7. Panfilova E.V., Zaitsev V.F. Commercial education in universities of Russia: assessment of accessibility and demand, Modern studies of social problems, 2023, No. 4, pp. 112-123.
8. Popova E.S. «Second Chance Education» and Alternative Trajectories as a Mechanism for Accumulating Human Capital // Education and Science in Russia: Status and Development Potential. 2019. No. 4. pp. 372-387.
9. Titov S.R. Paid Educational Services and Budget Financing of Public Institutions of Higher Education: The Relationship and Issues of Raising Funds // Bulletin of the Academy of Knowledge. -2020.-№36 (1). -pp. 340-347.
10. Khalimbekov Kh.Z., Fastovets I.P., Magomedova F.I. Analysis of the National and Regional Market of Paid Services in the System of Higher and Secondary Vocational Education // Bulletin of the Transbaikal State University. -2018.-№10.-pp. 128-126.
11. Kuzmichev I.K. Ensuring the Quality of Transport Education: Modern Challenges and Prospects / I.K. Kuzmichev, V.V. Kraynova//Scientific Problems of Water Transport. 2025. No. 83. Pp. 124-137.
12. Lavrenteva E.A. Legal Regulation of Independent Assessment of Qualifications of Water Transport Employees/ E.A. Lavrenteva, A.V. Nekrasov// Transport Affairs of Russia. 2023. No. 5. Pp. 198-203.
13. Government Resolution No. 1830 of November 19, 2025 “On approval of the Rules for determining the maximum number of places for admission to higher education programs under education contracts concluded upon admission to study at the expense of an individual and (or) legal entity for the 2026/27 academic year

14. Order of the Government of the Russian Federation No. 3339-r of November 19, 2025 “List of areas of training and specialties of higher education, scientific specialties for which the maximum number of places for admission to higher education programs under education contracts concluded upon admission to study at the expense of an individual and (or) legal entity for the 2026/27 academic year is determined
15. Order of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 913 of November 27, 2025 “On approval of the criteria and procedure for establishing restrictions on admission to Bachelor's, Specialist's, and Master's Degree Programs on a Contractual Basis
16. Order of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 1099 of December 30, 2025, «On Approving the Maximum Number of Places for Admission to Higher Education Programs Under Education Agreements Concluded for Admission to Study at the Expense of an Individual and/or Legal Entity for the 2026/27 Academic Year»

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Крайнова Вера Владимировна, кандидат экономических наук., доцент, проректор по образовательной деятельности, доцент кафедры бухгалтерского учета, анализа и финансов Волжский государственный университет водного транспорта», 603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: krainova.vv@vsuwt.ru

Vera V. Krainova, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Vice-Rector for Educational Affairs, Associate Professor of the Department of Accounting, Analysis and Finance, Volga State University of Water Transport, 5 Nesterova str., Nizhny Novgorod, 603950, e-mail: krainova.vv@vsuwt.ru

Статья поступила в редакцию 07.08.2026; принята к публикации 20.08.2026; опубликована онлайн 20.09.2026. Received 07.08.2026; published online 20.09.2026.

УДК 656.6
DOI: 10.37890/jwt.vi88.725

Моделирование транспортно-логистических процессов с использованными поддонами в экономике замкнутого цикла

В.В. Цверов
ORCID: 0000-0003-0835-4615
Е.В. Разина
Волжский государственный университет водного транспорта», г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. На грузовых терминалах, перерабатывающих тарно-штучные грузы, образуются большие объемы не пригодных к использованию деревянных поддонов. В настоящее время на грузовых терминалах (морских и речных портах, железнодорожных станциях) основным вариантом обращения с ними является отправка на свалку. Но этот вариант в условиях старта с 2025 г. федерального проекта «Экономика замкнутого цикла» в составе нацпроекта «Экологическое благополучие», в котором ставится задача максимально использовать материальные ресурсы и после прихода их в негодность по основному назначению, нельзя считать рациональным во всех случаях. В работе формируются модели транспортно-логистического процесса обращения с использованными деревянными поддонами, включающими: отправку их на свалку в не переработанном и переработанном в щепу виде; ремонт и вторичное использование в транспортно-логистическом процессе; переработку в мульчу и пеллеты с последующей продажей на рынке в качестве вторичных материальных ресурсов. Для разработанных моделей обращения с деревянными поддонами получены аналитические зависимости для оценки эффективности их использования, что позволяет принимать решение об целесообразном для склада или грузового терминала варианте обращения с ними.

Ключевые слова: деревянные поддоны; вторичные материальные ресурсы; грузовые терминалы; транспортно-логистический процесс; циркулярная экономика; моделирование; обращение с поддонами; логистический процесс

Modeling of transport and logistics processes with used wooden pallets in the circular economy

Vladimir V. Tsverov
ORCID: 0000-0003-0835-4615
Ekateruba V. Razina
Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract At cargo terminals that handle packaged cargo, large volumes of unusable wooden pallets are formed. Currently, at cargo terminals (sea and river ports, railway stations), the main option for handling them is to send them to a landfill. But this option cannot be considered rational in all cases in the context of the start of the federal project «circular economy» as part of the national project «environmental well-being», which sets the task of maximizing the use of material resources even after they become unusable for their main purpose. In the work, models of the transport and logistics process of handling used wooden pallets are formed, including: sending them to the landfill in unprocessed and chipped form; repair and reuse in the transport and logistics process; processing into chips and pellets with subsequent sale on the market as secondary material resources. For the developed models of handling wooden pallets, analytical dependencies were obtained to assess the efficiency of

their use, which makes it possible to make a decision on the appropriate option for handling them for a warehouse or cargo terminal.

Keywords: wooden pallets; secondary material resources; cargo terminals; transport and logistics process; circular economy; modeling; pallet handling; logistics process

Введение

Деревянные поддоны являются одним из основных видов товарных носителей в различных отраслях промышленности, торговли и транспорта.

На них перевозится и хранится порядка 80% всех тарно-штучных грузов [1]. При этом обращение поддонов характеризуется средним срок службы - в 2-3 цикла [2]. Это приводит к задаче принятия решения о дальнейшей их использованных в транспортно-логистическом процессе.

Актуальность задачи определяется следующим:

– ежегодный объем производства деревянных поддонов для использования в транспортно-логистическом процессе в России достиг по поданным Busines Stat 67,5 млн шт. в 2024 г. и прогнозируется стабилизация производства на уровне 65–70 млн шт./год. [2, 3]. При этом решение о списании принимается с небольшим временным лагом, так срок их службы относительно небольшой;

– кроме того, на территории России в обороте находятся поддоны, на которых прибывают импортные грузы.

– Значительная часть поддонов выводится из эксплуатации. На перегрузочных терминалах причинами могут быть:

– поломки поддонов в ходе перегрузочных работ;

– потеря несущей способности по причине естественного старения;

– освобождения поддонов от груза в следствие принятой системы хранения груза на складе - без товароносителей;

– освобождения поддонов от груза в следствии принятой технологии размещения груза в транспортных средствах на последующем этапе транспортировки - без товароносителей;

– освобождения поддонов от груза из-за необходимости перегрузки груза на другие типы товароносителей, являющейся требованием системы хранения на складе;

– освобождения поддонов от груза из-за необходимости перегрузки груза на другие типы товароносителей, являющейся требованием размещения груза в транспортных средствах на дальнейшем пути маршрута доставки груза.

В результате на терминалах образуются большие объемы не используемых деревянных поддонов. При этом нерациональное обращение со списываемыми поддонами приводит к существенным экономическим потерям. Кроме того, существует острая экологическая проблема утилизации списанных поддонов.

Все это делает актуальным принятие рационального решения о дальнейшем транспортно-логистическом процессе с использованными деревянными поддонами.

Анализ опыта обращения с использованными деревянными поддонами

В Российской Федерации списание поддонов регулируется нормативами утилизации (до 20% для деревянной тары - по нормативам расширенной ответственности производителя), с обязательной переработкой или оплатой экологического сбора (3066 руб./т в 2020–2024 гг. [4]). Самостоятельная утилизация (сжигание) запрещена; требуется обращение к специализированным компаниям для дробления в щепу или вторичное использование [4]. При этом отсутствие единой

системы и статистики по объемам списания приводит к накоплению отходов на складах, потери от которых оцениваются обходятся производству 25–30% [5].

В США, по данным отраслевых опросов в 2021 году [6,7], производство новых поддонов составляет 919 млн единиц (стрингерные - 77% производства, блочные - 19%). За счет ремонта и восстановления в число эксплуатируемых добавляется еще 280 мил единиц. Такой подход позволяет снижать затраты на товароносители приблизительно на 30%. Общий объем поддонов в обращении в США оценивается в 2,6–3,1 млрд единиц, из которых 90% деревянные, обеспечивающие около 80% внутренних поставок товаров.

В Китае в 2020 году насчитывалось более 1,55 млрд поддонов. Производство деревянных поддонов потребляет 10,69 млн тонн бревен (85% сырья), с общим потреблением материалов 12,51 млн тонн. Обращение характеризуется многократным использованием: легкие стрингерные поддоны выдерживают 10 поездок, тяжелые — до 38, блочные — 16-66 поездок, в зависимости от нагрузки и конструкции.

На предприятиях преобладают смешанные системы: в Польше значительная доля компаний применяет смешанный подход к использованию поддонов. Предприятия сочетают возвратные и невозвратные поддоны, при этом в 68% случаев 81-100% от общего объема поддонов имеют деревянные компоненты.

В США к обращению с деревянными поддонами применяется подход экономики замкнутого цикла (циркулярной экономики). Результаты применения циркулярного подхода к использованным деревянным поддонам:

– только 5% попадают на свалки после восстановления (13% до),

– остальное — переработка (37,3% досок повторно, 17,3% топливо, 40,4% мульча).

В 2021 году менее 1% массы утилизировался, 5% измельчалось (54% из них на биотопливо).

В Китае коэффициент отходов для деревянных поддонов — 58,6%, в основном на производстве, что выше, чем для пластиковых (0,12%) [7].

Сравнение вариантов обращения с использованными деревянными поддонами в США представлено в табл. 1.

Таблица 1

Результаты применения циркулярного подхода к использованным деревянным поддонам в США (2021 г., % от полученных поддонов) [1, 6, 7]

Путь	Доля (%)	Применение
Ремонт и продажа	78	Повторный оборот
Разборка для восстановления	11	Компоненты в новые поддоны
Повторное использование без ремонта	5	Прямой оборот
Измельчение	5	Биотопливо (54%), мульча (35%)
Свалка	<1	Утилизация

Одним из современных вариантов управления оборотом поддоном является пулинг паллет — это модель управления оборотной тарой, при которой компания пользуется стандартными деревянными поддонами, находящимися в собственности специализированного оператора. Вместо покупки или аренды паллет предприятие берет их во временное использование, оплачивая только период фактической эксплуатации [8].

Таким образом международный опыт показывает широкие возможности применения циркулярной экономики в сфере обращению деревянных поддонов.

Материалы и методы

При исследованиях процесса обращения с деревянными поддонами на грузовых терминалах и складах использованы теоретическая база [9, 10, 11] и законодательные акты по экономике замкнутого цикла [12], логистический и системный подходы к исследуемому объекту [13, 14] и основы моделирования логистических систем [15]. На их основе разработана модели обращения со списываемыми деревянными поддонами с разной степенью переработки их во вторичные материальные ресурсы. Для этих моделей на основе калькуляции затрат по логистическим операциям процесса обращения получены аналитические зависимости оценки их экономической эффективности.

Модели транспортно-логистических процессов обращения с использованными деревянными поддонами

Возможными решениями по использованным деревянным поддонам на грузовых терминалах и складах могут быть:

– отправка поддонов на свалку (в не переработанном виде) с соответствующей оплатой экологического сбора;
– повторное использование на терминале;
– продажа поддонов для дальнейшего использования;
– ремонт для продления эксплуатации;
– разборка для получения компонентов для производства новых поддонов;
– отправка на свалку с подготовкой к транспортировке путем дробления поддонов в щепу с помощью шредеров (для повышения использования транспортных средств по грузоподъемности при перевозках на свалку);
– переработка поддонов на топливо с последующей продажей;
– переработка поддонов на мульчу с последующей продажей;
– использование услуг оператора пулинга палет.

Сформируем модели транспортно-логистических процессов обращения с использованными поддонами (ТЛПОсИП) по этим вариантам и аналитические зависимости для оценки их экономической эффективности.

***Модель ТЛПОсИП 1 - с отправкой использованных поддонов на свалку (в не переработанном виде)**:*

1. Окончание использования поддонов в транспортно-логистическом процессе;
2. Складирование использованных поддонов на складе;
3. Хранение использованных поддонов на складе;
4. Погрузка использованных поддонов в транспортные средства (свои или наемные);
5. Транспортировка использованных поддонов на свалку;
6. Оплата экологического сбора.

Издержки ТЛПОсИП по модели 1 определяются по формуле 1:

$$И_{м1} = З_{СХС} + З_{П} + З_{Т} + З_{Э\,С}, \quad (1)$$

где $З_{СХС}$ – затраты на складирование и хранение использованных поддонов, подлежащих отправке на свалку, на складе, руб.;
$З_{П}$ – затраты на погрузку использованных поддонов в транспортные средства, руб.;
$З_{Т}$ – затраты на транспортировку использованных поддонов на свалку, руб.;
$З_{Э\,С}$ – затраты на экологический сбор, руб.

Модель ТЛПОсИП 2 – с дроблением поддонов в щепу с помощью шредеров перед вывозом на свалку. Это позволяет повысить коэффициент использования транспортных средств по грузоподъемности при транспортировке на свалку и соответственно снизить расходы на эту. Издержки в модель с отправкой использованных поддонов на свалку в переработанном в щепу виде определяются по формуле 2:

$$И_{м2} = З_{схс} + З_{пш} + З_{пщ} + З_{тщ} + З_{э\,с} \quad (2)$$

где $З_{Щ}$ – затраты на переработку списанных поддонов в щепу, руб.;

$З_{ПЩ}$ – затраты на погрузку щепы из поддонов в транспортные средства, руб.;

$З_{ТЩ}$ – затраты на транспортировку щепы из поддонов на свалку, руб.

Модель ТЛПОсИП 3 - с повторным использованием поддонов (рис. 1)*,* по данным [6] к ним относятся около 5% всех использованных поддонов.

Номерами на модели указана последовательность выполнении логистических операций:

1.Окончание использования поддонов в транспортно-логистическом процессе;

2. Перемещение поддонов из зоны тарно-штучных грузов на склад поддонов;

3. Складирование и хранение использованных поддонов;

4.Экспертиза состояния поддонов и сортировка по возможности дальнейшего использования:

4.1. Складирование и хранение поддонов, пригодных к эксплуатации

4.2. Складирование и хранение поддонов, подлежащих списанию.

5. Перемещение поддонов подлежащих списанию на склад отходов;

6. Хранение отходов;

7. Заключение договора поставки поддонов б/у;

8. Доставка поддонов б/у покупателям;

9. Оплата поставки поддонов б/у;

10. Заключение договора на захоронение отходов на полигоне;

11. Перевозка отходов на полигон;

12. Оплата экологического сбора.

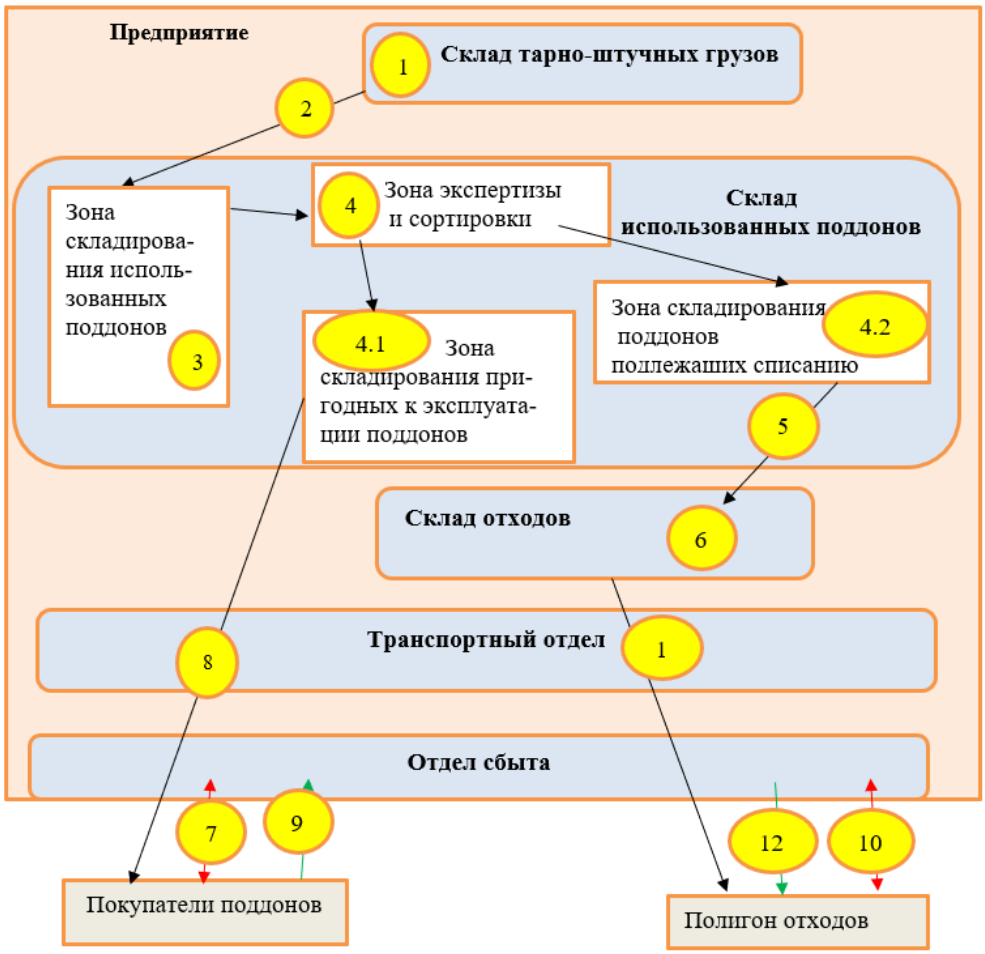


Рис. 1. Организационно-операционная модель ЛПсИДП 3 - с повторным использованием поддонов. Стрелками отражено направление потоков: черные – материальные потоки, зеленые – финансовые потоки

Экономический результат модели с повторным использованием поддонов определяется по выражению:

$$Э_{мз} = Д_{сип} + Э_{пип} - (З_э + З_{схпи} + З_{сх\,п} + З_{схс} + З_п + З_т + З_э + З_{сип}), \quad (3)$$

где $З_э$ – экспертиза состояния поддонов и сортировка по возможности дальнейшего использования, руб.;

$З_{сх\,пи}$ – затраты на складирование и хранение использованных поддонов, которые будут повторно использоваться на терминале, руб.;

$З_{сх\,п}$ – затраты на складирование и хранение использованных поддонов, которые подлежат продаже, руб.;

$З_{сип}$ – затраты на сбыт использованных поддонов, которые подлежат продаже, руб.;

$Д_{сип}$ – доходы от сбыта использованных поддонов, руб.;

$Э_{пип}$ – экономия затрат от повторного использования поддонов, руб.

Экономия затрат от повторного использования поддонов может быть приравнена к их стоимости на рынке использованных поддонов.

Модель ТЛПОсИП 4 - с ремонтом использованных поддонов (рис. 2). Является развитием ТЛПОсИП по модели 3 - с повторным использованием поддонов, заключающимся в том, что поддоны, классифицированные как «по техническому состоянию не могущие эксплуатироваться», не отправляются на свалку, а подлежат дополнительной сортировке с выделением подлежащих ремонту и восстанавливаются до эксплуатационного состояния, по данным [6] к ним относятся 78% всех использованных поддонов.

Последовательность выполнении логистических операций в модели следующая:

1.Окончание использования поддонов в транспортно-логистическом процессе;

2. Перемещение поддонов из зоны тарно-штучных грузов на склад поддонов;

3. Складирование и хранение использованных поддонов;

4.Экспертиза состояния поддонов и сортировка по возможности дальнейшего использования:

4.1. Складирование и хранение поддонов, пригодных к эксплуатации

4.2. Складирование и хранение поддонов, требующих ремонта для дальнейшей эксплуатации;

4.3. Складирование и хранение поддонов, подлежащих списанию.

5.2. Ремонт поддонов и отправка их на материальный склад;

5.2.1. Перемещение отремонтированных поддонов на склад поддонов пригодных к эксплуатации;

5.2.2. Перемещение отходов из зоны ремонта поддонов на склад отходов;

5.3.2. Перемещение поддонов подлежащих списанию на склад отходов;

6. Хранение отходов;

7. Заключение договора поставки поддонов б/у;

8. Доставка поддонов б/у покупателям;

9. Оплата поставки поддонов б/у;

10. Заключение договора на захоронение отходов на полигоне;

11. Перевозка отходов на полигон;

12. Оплата экологического сбора.

Экономический результат ТЛПОсИП по 4-й модели с ремонтом использованных поддонов определяется по выражению

$$Э_{М4} = Д_{СИП} + Э_{ПИП} - (З_Э + З_{СХПИ} + З_{СХП} + З_{СХС} + З_П + З_Т + З_Э + З_{СИП} + З_{СХР} + З_{РП}), \quad (4)$$

где $З_{СХ\ Р}$ – затраты на складирование и хранение на складе подразделения, занимающегося ремонтом поддонов, руб.;

$З_{РП}$ – затраты на ремонт поддонов, руб.

Модель ТЛПОсИП 5 - с переработкой неподлежащих ремонту поддонов в мульчу. Является развитием ТЛПОсИП по модели 4 - с ремонтом использованных поддонов, заключающимся в том, что поддоны, классифицированные как «требующие списания (не подлежащие ремонту)», не отправляются на свалку, а перерабатываются с помощью шредеров в мульчу, которая упаковывается в биг-бэги и продается на рынке. Это сокращает объемы вывоза на свалку до 5% от массы списываемых поддонов, и, соответственно, сокращает расходы на вывоз на свалку и платежи по экологическому сбору. Кроме того, позволяет получить дополнительный доход, который зависит от объема переработанных поддонов.

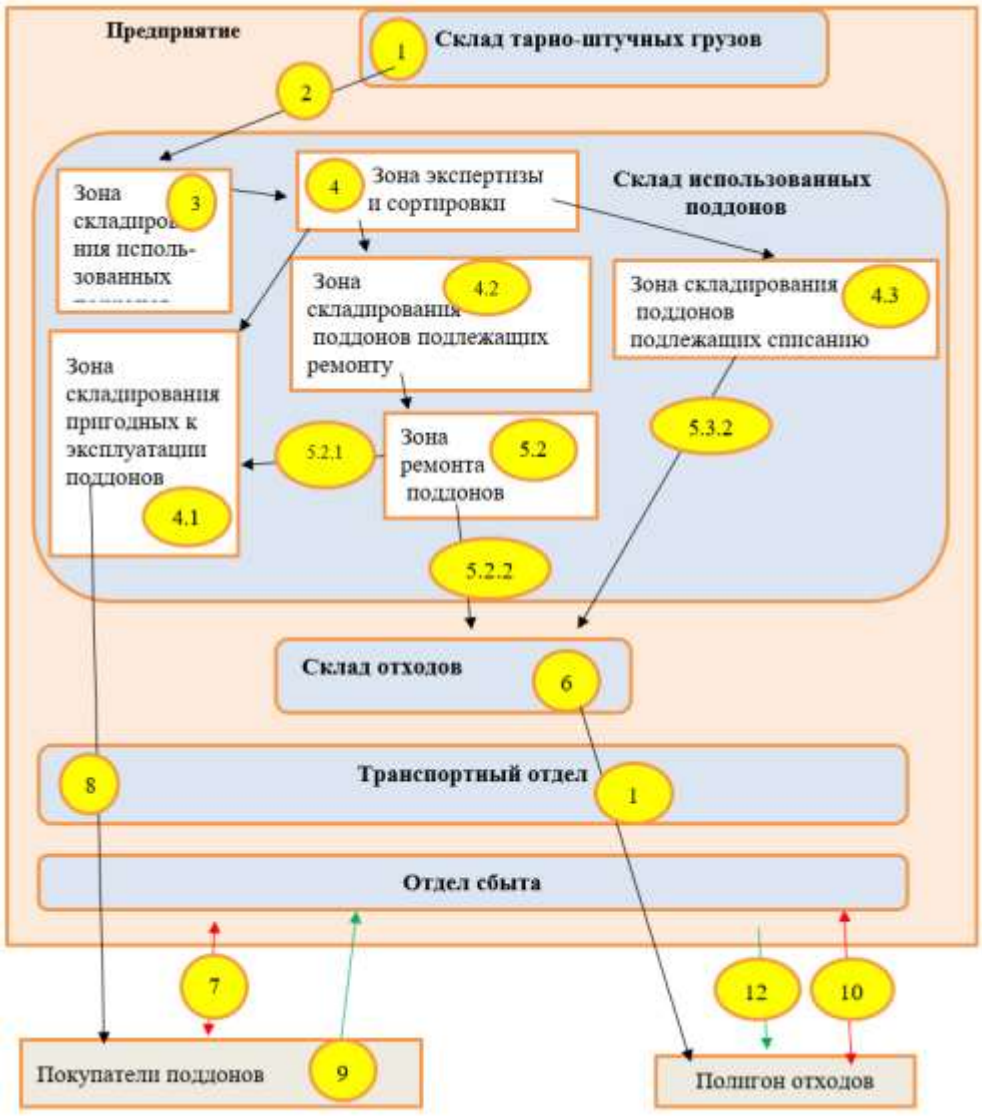


Рис. 2. Организационно-операционная модель ЛПсИДП 4 - с ремонтом использованных поддонов. Стрелками отражено направление потоков: черные – материальные потоки, зеленые – финансовые потоки

Экономический результат ТЛПОсИП по модели 5 определяется по выражению 5:

$$Э_{М5} = Д_{СИП} + Э_{ПИП} + Д_{М} - (З_{Э} + З_{СХПИ} + З_{СХП} + З_{СХС} + З_{ПО} + З_{ТО} + З_{Э} + З_{СИП} + З_{СХР} + З_{РП} + З_{МУ} + З_{СМ}), \quad (5)$$

где $Д_{М}$ – доходы от продажи мульчи из списанных поддонов, руб.;

$З_{МУ}$ – затраты на переработку списанных поддонов в мульчу и упаковку их в биг-бэги, руб.;

$З_{СМ}$ – затраты по сбыту мульчи из списанных поддонов, руб.

Модель ТЛПОсИП 6 - с переработкой неподлежащих ремонту поддонов в топливные гранулы (пеллеты). Является развитием ТЛПОсИП по модели 4 - с ремонтом использованных поддонов, заключающимся в том, что поддоны,

классифицированные как «требующие списания (не подлежащие ремонту)», не отправляются на свалку, а подлежат переработке с помощью шредеров в щепу, которая после этого отправляется на линию для производства топливных пеллет. Пеллеты упаковываются в мешки по 15 кг и продаются на рынке. Это сокращает объемы вывоза на свалку до 5% от массы списываемых поддонов, и соответственно сократить расходы на вывоз на свалку и платежи по экологическому сбору. Кроме того, позволяет получить дополнительный доход от продажи пеллет.

Экономический результат ТЛПОсИП по модели 6 - с переработкой неподлежащих ремонту поддонов продаже их в виде топливных гранул определяется по формуле 6:

$$Э_{м6} = Д_{сип} + Э_{пип} + Д_{п} - (З_{э} + З_{схпи} + З_{сх\,п} + З_{схс} + З_{по} + З_{то} + З_{э} + З_{сип} + З_{схр} + З_{рп} + З_{щ} + З_{сп} + З_{пп}), \quad (6)$$

где $Д_{П}$ – доходы от продажи топливных гранул из списанных поддонов, руб.;
$З_{ПП}$ – затраты на производство топливных гранул, руб.;
$З_{СП}$ – затраты по сбыту топливных гранул из списанных поддонов, руб.

Модель ТЛПОсИП 7 – с разборкой поддонов для получения компонентов для производства новых поддонов. Является развитием модели с ремонтом использованных поддонов, заключающимся в том, что поддоны, классифицированные как «требующие списания (не подлежащие ремонту)», не отправляются на свалку, а подлежат разборке на вторичные материальные ресурсы: комплектующие для новых поддонов и получения мульчи с помощью шредеров с упаковкой ее в биг-бэги и продажи на рынке. На них может проходиться порядка 11% всех использованных поддонов [6].

Экономический результат ТЛПОсИП по модели 7 определяется по формуле 7:

$$Э_{м5} = Д_{сип} + Э_{пип} + Д_{щм} + З_{к} - (З_{э} + З_{схпи} + З_{сх\,п} + З_{схс} + З_{по} + З_{то} + З_{э} + З_{сип} + З_{схр} + З_{рп} + З_{му} + З_{см} + З_{рп}), \quad (7)$$

где $З_{к}$ – стоимость комплектующих, полученных из списанных поддонов, руб.;
$З_{РП}$ – затраты на разборку поддонов на комплектующие, руб.

Апробация

Результаты расчетов экономического результата по семи приведенным моделям для ООО «ОптРесурс» приведены на рис. 3.

Вывод: из сформированных и рассмотренных девяти моделей обращения с использованными поддонами на терминалах и складах наименее эффективной является первая - с отправкой использованных поддонов на свалку (в не переработанном виде). При этом она является наиболее распространенной. Рациональность использования остальных восьми моделей зависит от размера потока использованных поддонов, особенностей транспортно-логистического процесса на терминале и условий рынка. В целом при формировании комплекса инфраструктуры транспорта [16] целесообразно предусматривать создание КСнОИП.

Заключение

Для решения актуальной задачи снижения экологической нагрузки на окружающую среду и повышения эффективности транспортно-логистических

процессов авторами сформированы девять моделей обращения с использованными в транспортно-логистическом процессе деревянными поддонами на грузовых терминалах и складах:

1)модель с отправкой использованных поддонов на свалку (в непереработанном виде);
2) модель с повторным использованием поддонов;
3) модель с ремонтом использованных поддонов;
4) модель с переработки неподлежащих ремонту поддонов с



Рис. 3. Экономические результаты оценки вариантов ЛПОсИДП

4.1) дробление поддонов в щепу с помощью шредеров перед вывозом на свалку.
4.2) дробление поддонов в мульчу с помощью шредеров с упаковкой ее в биг-бэги для продажи на рынке;
4.3) переработка поддонов в топливные пеллеты;
4.4) разборка для получения компонентов для производства новых поддонов.

Предложены аналитические зависимости для оценки экономической эффективности применения моделей транспортно-логистических процессов обращения с использованными поддонами, что может позволить принять обоснованные решения по вариантам обращения с поддонами на грузовых терминалах и повысить эффективность их деятельности.

Список литературы

1. Investigation of the status of the wooden pallet market during the COVD-19 pandemic // bioresources.cnr.ncsu.edu URL: https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/investigation-of-the-status-of-the-wooden-pallet-market-during-the-covd-19-pandemic/ (дата обращения: 12.10.2025).
2. Анализ рынка деревянных поддонов (паллет) в России в 2020-2024 г, прогноз на 2025-2029 гг // BusinesStat URL: https://businesstat.ru/catalog/id11833/ (дата обращения: 20.09.2025).
3. Чемезов Е. А., Власов М. В. Анализ автоматизации производства деревянных поддонов // Вестник науки. 2024. №11 (80). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-avtomatizatsii-proizvodstva-derevyannyh-poddonov (дата обращения: 02.10.2025).

4. Борисова Т.А. Пулинг паллет как способ сохранения окружающей среды и повышения эффективности бизнеса // Новая экономика, бизнес и общество. 2023. С. 444-448.
5. Экологический сбор в 2024 году // www.trial-market.ru URL: https://www.trial-market.ru/obzory/ekologicheskij-sbor-v-2024-godu.html (дата обращения: 02.10.2025).
6. Переработка б/у поддонов: проблемы и перспективы // aorlk.ru URL: https://aorlk.ru/pererabotka-b-u-poddony-problemy-i-perspektivy/ (дата обращения: 02.10.2025).
7. Assessing the life-cycle environmental impacts of the wood pallet sector in the United States // www.sciencedirect.com URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652621029255 (дата обращения: 12.10.2025).
8. Пулинг паллет: преимущества и особенности https://dagama.su/blog/puling-pallet-preimushchestva-i-osobennosti/ (дата обращения: 06.11.2025).
9. Валько Д. В. (2019). Циркулярная экономика: понятийный аппарат и диффузия концепции в отечественных исследованиях // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». № 2. С. 42–49. DOI: https://doi.org/10.17586/2310-1172-2019-12-2-42-49. (дата обращения: 28.02.2026)
10. Гурьева М. А. (2019). Теоретические основы концепта циркулярной экономики // Экономические отношения. Т. 9. № 3. С. 2311–2335. DOI: 10.18334/eo.9.3.40990.
11. Мочалова Л. А. Циркулярная экономика в контексте реализации концепции устойчивого развития // Journal of new economy. 2020. №4. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsirkulyarnaya-ekonomika-v-kontekste-realizatsii-kontseptsii-ustoychivogo-razvitiya (дата обращения: 28.02.2026).
12. Федеральный проект «Экономика замкнутого цикла» https://www.mnr.gov.ru/activity/environmental_well-being/federalnyy-proekt-ekonomika-zamknutogo-tsikla/ (дата обращения: 28.02.2026)
13. Семененко, А.И. Логистика. Основы теории: учебник / А.И. Семененко, В.И. Сергеев. – СПб. : Союз, 2001. – 544 с.
14. Волкова В. Н., Денисов А. А. Теория систем и системный анализ: учебник для академического бакалавриата. - 2-е. - М.: Юрайт, 2014. - 616 с. - ISBN 978-5-9916-4213-2.
15. Шапиро Дж. Моделирование цепи поставок / Пер. с англ. под ред. В. С. Лукинского - СПб.: Питер, 2006. - 720 с.
16. Коршунов Д. А. Формирование инфраструктуры комплекса внутреннего водного транспорта // Научные проблемы водного транспорта. 2022. No72(3). С. 111–120. DOI: 10.37890/jwt.vi72.289

References

1. Investigation of the status of the wooden pallet market during the COVID-19 pandemic // bioresources.cnr.ncsu.edu URL: https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/investigation-of-the-status-of-the-wooden-pallet-market-during-the-covd-19-pandemic/ (date of access: 12 October 2025).
2. Analysis of the wooden pallet market in Russia in 2020-2024, forecast for 2025-2029 // BusinesStat URL: https://businesstat.ru/catalog/id11833/ (date of access: 20 September 2025).
3. Chemezov E. A., Vlasov M. V. Analysis of automation of wooden pallet production // Bulletin of Science. 2024. No. 11 (80). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-avtomatizatsii-proizvodstva-derevyannyh-poddonov (accessed: 02.10.2025).
4. Borisova T.A. Puling pallet kak sposob sokhraneniya okruzhayushchey sredy i povysheniya effektivnosti biznesa // Novaya ekonomika, biznes i obshchestvo. 2023. S. 444-448.
5. Ekologicheskiy sbor v 2024 godu // www.trial-market.ru URL: https://www.trial-market.ru/obzory/ekologicheskij-sbor-v-2024-godu.html (data obrashcheniya: 02.10.2025).
6. Pererabotka b/u poddonov: problemy i perspektivy // aorlk.ru URL: https://aorlk.ru/pererabotka-b-u-poddony-problemy-i-perspektivy/ (data obrashcheniya: 02.10.2025).
7. Assessing the life-cycle environmental impacts of the wood pallet sector in the United States // www.sciencedirect.com URL:

https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652621029255 (data obrashcheniya: 12.10.2025).
8. Pallet pooling: advantages and features https://dagama.su/blog/puling-pallet-preimushchestva-i-osobennosti/ (accessed: 06.11.2025).
9. Val'ko D. V. (2019). Circular economy: conceptual apparatus and diffusion of the concept in domestic studies // Scientific journal of NRU ITMO. Series «Economics and environmental management». No. 2. pp. 42–49. DOI: https://doi.org/10.17586/2310-1172-2019-12-2-42-49. (accessed: 28.02.2026)
10. Guryeva M. A. (2019). Theoretical foundations of the circular economy concept // Economic relations. Vol. 9. No. 3. Pp. 2311–2335. DOI: 10.18334/eo.9.3.40990.
11. Mochalova, L. A. Circular Economy in the Context of Implementing the Sustainable Development Concept // Journal of New Economy. 2020. No. 4. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/tsirkulyarnaya-ekonomika-v-kontekste-realizatsii-kontseptsii-ustoychivogo-razvitiya (Accessed: 28.02.2026)
12. Federal Project «Closed Cycle Economy» https://www.mnr.gov.ru/activity/environmental_well-being/federalnyy-proekt-ekonomika-zamknutogo-tsikla/ (Accessed: 28.02.2026)
13. Semenenko, A.I. Logistics. Fundamentals of Theory: Textbook / A.I. Semenenko, V.I. Sergeev. - St. Petersburg: Soyuz, 2001. - 544 p.
14. Volkova, V.N., Denisov, A.A. Systems Theory and Systems Analysis: Textbook for the Academic Bachelor's Degree. - 2nd. - Moscow: Yurait, 2014. - 616 p. - ISBN 978-5-9916-4213-2.
15. Shapiro J. Supply Chain Modeling / Translated from English, edited by V. S. Lukinsky - St. Petersburg: Piter, 2006. - 720 p.
16. Korshunov D. A. Formation of the infrastructure of the inland water complex Transport // Scientific Problems of Water Transport. 2022. No72(3). Pp. 111–120. DOI: 10.37890/jwt.vi72.289

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Цверов Владимир Викторович, профессор, д.э.н., кафедра логистика и маркетинг, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: v.tsverov@yandex.ru

Vladimir V. Tsverov, Professor, Doctor of Economics, Department of Logistics and Marketing, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603950, e-mail: v.tsverov@yandex.ru

Разина Екатерина Васильевна, магистрант кафедры логистики и маркетинга, «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: ecat.2014@yandex.ru

Ekaterina V. Razina, Master's Degree Student, Department of Logistics and Marketing, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterova Street, Nizhny Novgorod, 603950, e-mail: ecat.2014@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 12.03.2026; принята к публикации 22.06.2026; опубликована онлайн 20.09.2026. Received 12.03.2026; published online 20.09.2026.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ, СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

WATER TRANSPORT OPERATION, WATERWAYS COMMUNICATONS AND HYDROGRAPHY

УДК 911.2
DOI: 10.37890/jwt.vi88.741

Межсезонная динамика стока малых рек лесостепной зоны Нижегородской области в условиях малоснежной зимы на примере р. Медяна

А.Е. Асташин[1,2]
ORCID: 0000-0003-2133-0888
Г.Д. Пономарев[1]
ORCID: 0009-0004-1745-6191
И.С. Гусев[1]
ORCID: 0009-0008-0197-9798
Т.С. Нефедова[1]
ORCID: 0009-0005-2961-9354
[1] *Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина, г. Нижний Новгород, Россия*
[2] *Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, Княгинино, Нижегородская область, Россия*

Аннотация. В настоящей работе рассматривается межсезонная динамика стока малых рек лесостепной зоны Нижегородской области в условиях малоснежной зимы 2024-2025 годов на примере реки Медяна. Наблюдения проводились на двух гидропостах, заложенных в верхнем и нижнем течении реки, в периоды весеннего половодья и летней межени. Результаты исследования показали значительное снижение речного стока в период весеннего половодья в 2025 году по сравнению с 2024 годом: на 23% в верхнем течении р. Медяна и на 73% в нижнем течении. Однако показатели минимального стока в период летней межени возросли на 4% в верхнем течении и на 66% в нижнем течении. Причиной данных изменений могло послужить резкое повышение температуры в зимнее время года, следствием которого стало увеличение оттепелей, влияющих на снижение глубины промерзания зоны аэрации, и сокращение запасов снега к наступлению периода снеготаяния, что в свою очередь привело к снижению поверхностного склонового стока и перераспределению талого стока в сторону подземного. Следствием влияния данных факторов стало снижение максимального расхода воды в период половодья. В свою очередь увеличение запасов грунтовых вод, определяющих питание реки в период межени, вызвало резкое увеличение меженного стока.

Ключевые слова: река Медяна, Нижегородская область, гидрология, динамика речного стока, малые реки лесостепи, внутригодовой сток рек.

Seasonal dynamics of small river flow in the forest-steppe zone of Nizhny Novgorod region in extremely low-snow winter based on the Medyana river case study

Andrej E. Astashin[1,2]
ORCID: 0000-0003-2133-0888
Grigoriy D. Ponomarev[1]
ORCID: 0009-0004-1745-6191
Ivan S. Gusev[1]
ORCID: 0009-0008-0197-9798
Tat'yana S. Nefedova[1]
ORCID: 0009-0005-2961-9354
[1] *Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University (Minin University), Russia*
[2 2]*Nizhny Novgorod state engineering and economic university, Knyaginino, Russia*

Abstract. The present study examines the interseasonal dynamics of small river flow in the forest-steppe zone of the Nizhny Novgorod region during the extremely low-snow winter of 2024-2025, using the Medyana River as a case study. Observations were conducted at two hydrological stations established in the upper and lower reaches of the river during the spring flood and summer low-water periods. The «velocity-area» method was used to determine water flow in the river. The results of the study showed a significant decrease in river flow during the spring flood in 2025 compared to 2024: a 23% reduction in the upper reach of the Medyana River and a 73% reduction in the lower reach. However, the minimum flow rates during the summer low-water period increased by 4% in the upper reach and by 66% in the lower reach. These changes may have been caused by a sharp rise in temperatures during the winter, leading to an increase in thaws that affected the reduction of the frost depth in the aeration zone and a decrease in snowpack by the time of snowmelt. This, in turn, resulted in a reduction in surface runoff and a redistribution of meltwater toward groundwater. Consequently, these factors led to a decrease in maximum water flow during the flood period. On the other hand, the increase in groundwater reserves, which support the river during low-water periods, resulted in a sharp increase in low-water flow.

Keywords: Medyana River, Nizhny Novgorod Region, hydrology, river flow dynamics, small rivers of the forest-steppe, intra-annual river flow

Введение

Малые реки, расположенные в пределах лесостепной зоны России, являются наиболее чувствительными к климатическим изменениям и сезонным факторам, таким как малоснежные зимы, что, в свою очередь, приводит к более быстрому проявлению реакции на изменения условий формирования речного стока. Не менее важным фактором, определяющим формирование речного стока, является антропогенная нагрузка, выраженная высокой долей пахотных земель в пределах речных бассейнов лесостепной зоны Нижегородской области. Данный показатель преимущественно определяет формирование расхода воды в реке в период половодья, а как следствие и в период межени, поскольку коэффициент поверхностного стока распаханных территорий значительно выше, чем в пределах территорий, занятых лесной и травянистой растительностью [1]. В свою очередь, именно речной сток является одним из наиболее важных физико-географических и геологических процессов, специфика которого напрямую определяет гидрологический режим водных объектов [2].

Исходя из этого, наиболее важной задачей в условиях изменения климата и ведения интенсивной сельскохозяйственной деятельности в пределах бассейнов малых рек лесостепной зоны России становится изучение речного стока малых рек, напрямую влияющего на полноводность крупных судоходных рек [3]. Именно на

малые реки приходится основная доля речной сети России. Их количество составляет 98% от общего числа рек, а протяжённость – 71% от суммарной длины всех водотоков страны [4]. Однако в настоящее время динамика внутригодового распределения стока зачастую является предметом исследования лишь на уровне крупных речных бассейнов [5], хотя её анализ становится не менее актуальным и для малых рек, являющихся одним из наиболее важных элементов гидрологической сети.

Таким образом, исследование внутригодовой динамики стока малых рек лесостепной зоны является актуальной задачей с точки зрения понимания закономерностей функционирования речных сетей. Полученные данные могут служить основой для разработки мер по сохранению и рациональному использованию водных ресурсов, а также прогнозирования возможных изменений гидрологического режима в условиях меняющегося климата.

Целью данной работы стало выявление межсезонной динамики стока малой реки лесостепной зоны Нижегородской области р. Медяна в условиях малоснежной зимы.

Методы

Исходным материалом для анализа послужили данные, полученные в ходе полевых исследований, проведённых научно-исследовательской группой в 2024-2025 годах. Для проведения исследования был выбран водосборный бассейн реки Медяна, расположенный на юго-востоке Нижегородской области в пределах ландшафтной зоны лесостепи. По классификации Б.Д. Зайкова выбранная река относится к группе рек восточно-европейского типа, характеризующегося высоким уровнем весеннего половодья, низкой летней и зимней меженью, а также несколько повышенным осенним стоком [6]. Выбор данной территории был обусловлен её репрезентативностью, определяющейся сходством ландшафтно-гидрологических особенностей на зональном уровне с иными малыми реками лесостепной зоны России.

Наблюдения проводились в период весеннего половодья и летней межени на двух гидропостах, заложенных в верхнем и нижнем течении р. Медяна. Для определения расхода воды в реке было выполнено измерение ширины и глубины русла в заданной точке, позволившее построить поперечный профиль русла реки и вычислить площадь живого сечения. Затем было проведено измерение средней скорости течения реки при помощи гидрологической вертушки. Далее исходя из полученных данных был рассчитан расход воды по следующей формуле (1):

$$Q = V_{теч.} \times S_{жив.сечения}, \quad (1)$$

где Q – расход воды, $м^3/с$;
$V_{теч.}$ – скорость течения м/с;
$S_{жив.сечения}$ – площадь живого сечения, $м^2$.

Анализ межсезонной динамики стока был выполнен в виде сравнительной характеристики показателей расхода воды на двух гидропостах, расположенных в верхнем и нижнем течении реки Медяна. Сезонные изменения расхода воды в 2025 г. по отношению к 2024г. приводятся в процентном соотношении.

Для выполнения физико-географической характеристики территории водосборного бассейна р. Медяна были использованы литературные данные, материалы собственных полевых исследований, данные дистанционного зондирования Земли, а также тематические карты изучаемой территории.

Результаты

Водосборный бассейн реки Медяна площадью 996 км² расположен в юго-восточной части Нижегородской области в пределах лесостепной зоны и относится к бассейну р. Сура (рис. 1). Территория бассейна охватывает Пильнинский, Краснооктябрьский и Сеченовский муниципальные округа.



Рис. 1. Географическое положение бассейна р. Медяна

Морфолитогенная основа бассейна отличается сложным строением. Дочетвертичные отложения [Геологическая карта: N-38-V (Шумерля). Государственная геологическая карта Российской Федерации. Издание второе.

Геологическая карта и карта полезных ископаемых дочетвертичных образований. Средневолжская серия, масштаб: 1:200000, серия: Средневолжская, составлена: ФГУГП «Волгагеология», 2001 г., редактор(ы): Фридман Б.И.] представлены отложениями юрской системы в центральной части (глины, мергели, алевролиты, пески), меловой системы на водоразделах и верхних частях склонов (глины, алевролиты, пески, песчаники, фосфоритовые конгломераты), а также отложениями татарского яруса пермской системы в северо-восточной части изучаемой территории (глины, известняки, доломиты, мергели, алевролиты, песчаники) (рис. 2).

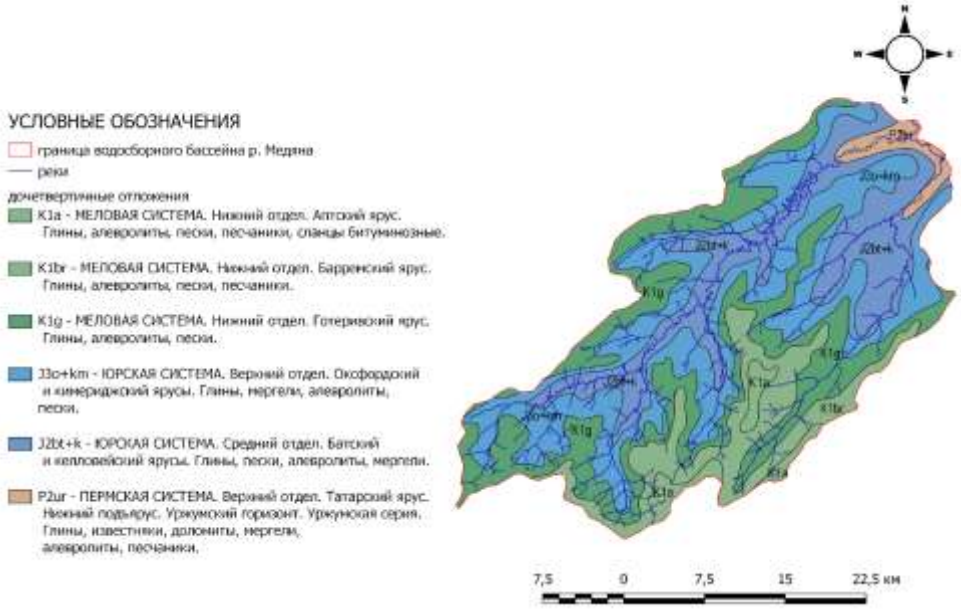


Рис. 2. Дочетвертичные отложения бассейна р. Медяна

Четвертичные образования [Карта четвертичных отложений: N-38-V (Шумерля). Государственная геологическая карта Российской Федерации. Издание второе. Карта четвертичных образований. Средневолжская серия, масштаб: 1:200000, серия: Средневолжская, составлена: ФГУГП «Волгагеология», 2001 г., редактор(ы): Фридман Б.И.] включают аллювиальные отложения в поймах рек, а также элювиальные и делювиальные образования плейстоцена и неоплейстоцена, представленные суглинками, лёссовидными суглинками, погребёнными почвами и песками (рис. 3).

На северо-востоке водосборного бассейна р. Медяна распространены карбонатные и гипсоносные породы пермского возраста, что обуславливает активное развитие карста.

Территория водосборного бассейна р. Медяна характеризуется равнинным рельефом, осложнённым сетью оврагов и балок (рис. 4). Амплитуда абсолютных высот значительна (175 м): максимальная отметка (243 м) расположена на южной периферии водосборного бассейна, минимальная (68 м) лежит на севере – уровень уреза воды в р. Медяна при её впадении в р. Сура. Современный морфологический облик сформирован под действием комплекса рельефообразующих процессов, среди которых ведущую роль играют делювиальный смыв, аккумуляция рыхлого материала и карстообразование.

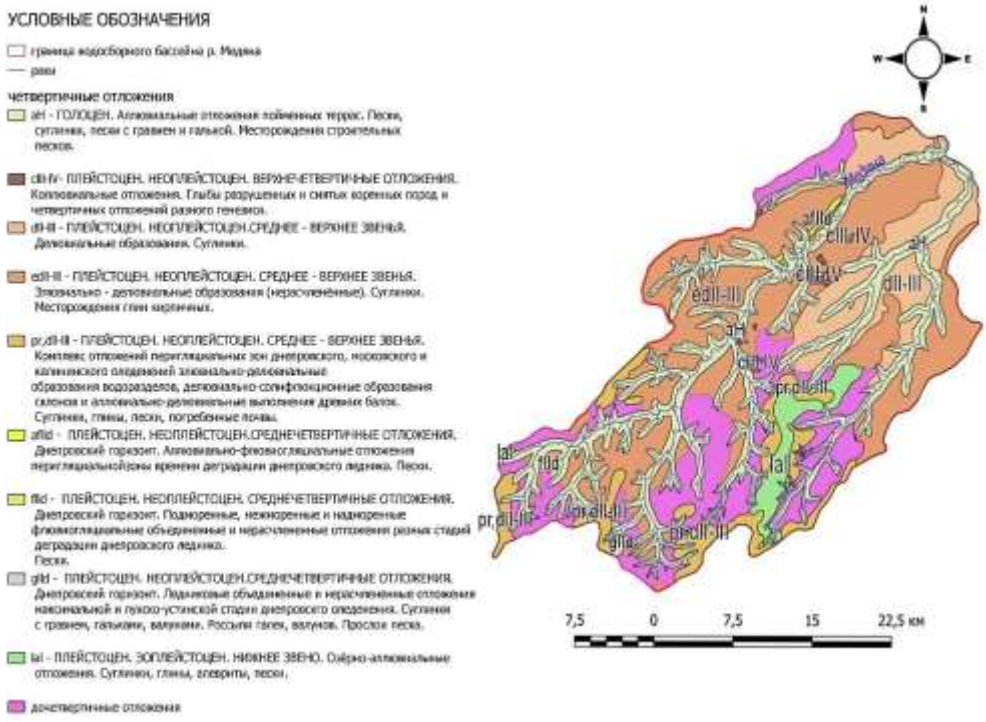


Рис. 3. Четвертичные отложения бассейна р. Медяна

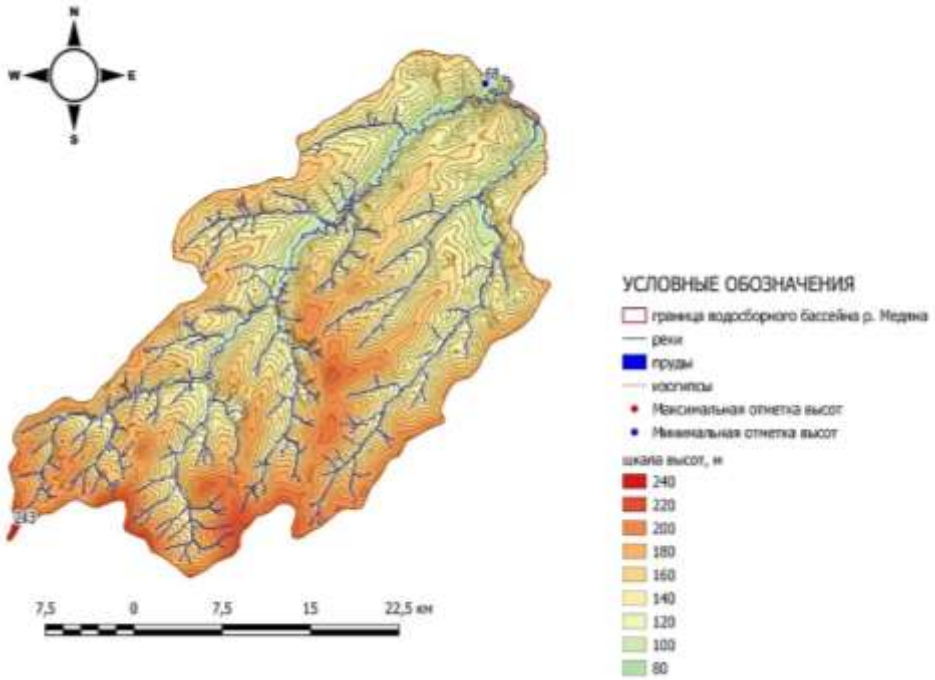


Рис. 4. Рельеф бассейна р. Медяна

Климат умеренно континентальный (рис. 5). Характерны продолжительная холодная зима и относительно короткое, но тёплое лето. Средние показатели в январе

опускаются до –10,6 °С, тогда как в июле достигают +19,3 °С. Среднегодовая температура воздуха составляет +5,5 °С. Количество атмосферных осадков за год составляет около 570 мм. Низкая лесистость территории способствует повышенной испаряемости и неустойчивому увлажнению, что усиливает континентальность климата.

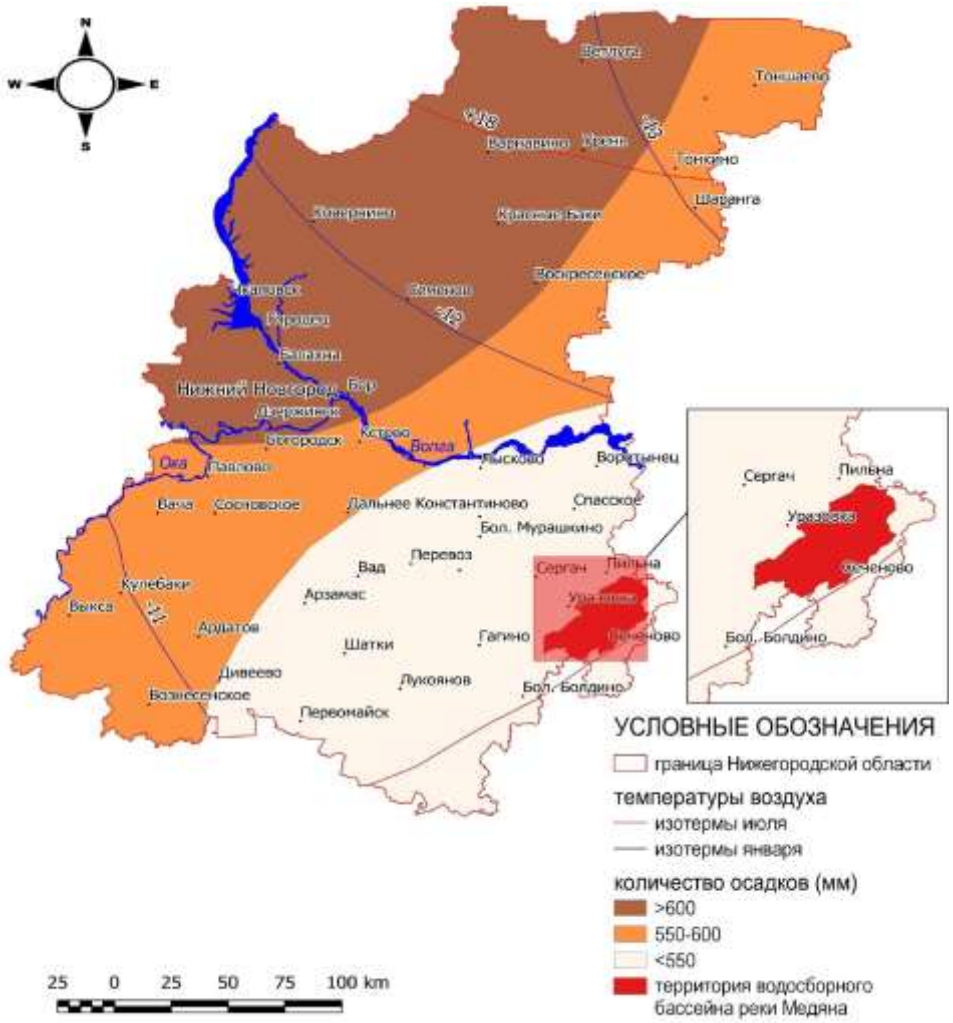


Рис. 5. Положение бассейна р. Медяна
на климатической карте Нижегородской области

Гидрографическая сеть включает главную р. Медяна и её притоки – рр. Мочалейка, Малая Медяна и Сум. В бассейне зафиксировано девять родников, а также ряд озёр карстового происхождения, наиболее известными из которых являются Чембилеевские озёра Кэркюле и Тюгяряк-Кюль [Асташин А.Е., Пашкин М.Н., Самойлов А.В., Власов А.В., Колповский А.В., Рыжов Е.В., Подковырина В.М., Гречкина С.С., Ватина О.Е. Озера Кэркюле и Тюгяряк Кюль водосборного бассейна реки Медяна Нижегородской области: морфометрические и гидрологические характеристики. В сборнике: Проблемы экологии Волжского бассейна. Труды 6-й всероссийской научной конференции. Нижний Новгород, 2021. С. 1.] (рис. 6).

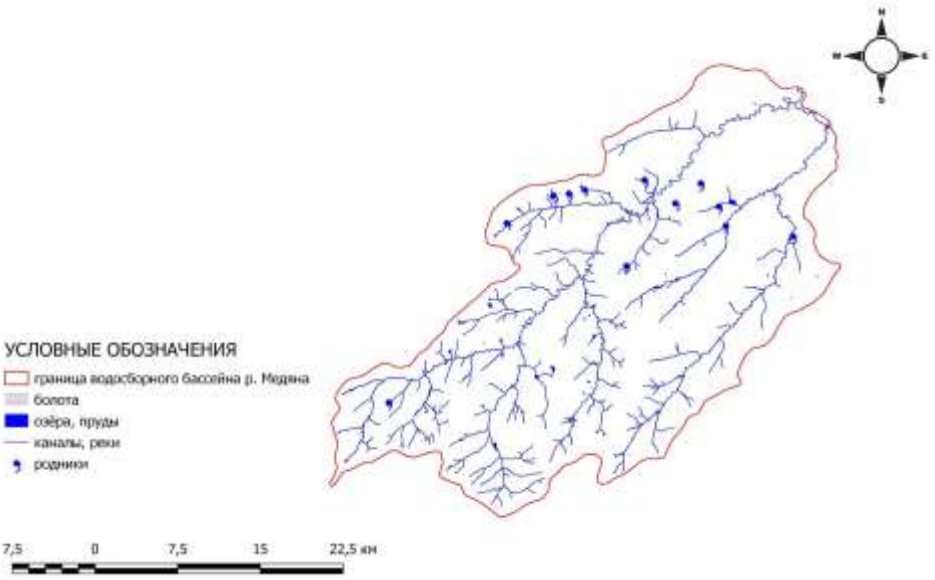


Рис. 6. Гидрографическая сеть бассейна р. Медяна

Почвенный покров бассейна представлен преимущественно чернозёмами: выщелоченными и оподзоленными среднемощными разновидностями, часто в комплексе со смытыми почвами. Растительность сохранилась фрагментарно: древесная – в оврагах и балках (широколиственные леса из осины, дуба, клёна), коренная степная – на плакорных участках, пойменные леса – вдоль рек. В современной структуре растительных сообществ доминируют агроценозы (посевные и пропашные культуры, реже сады). Общая лесистость бассейна крайне низка и составляет около 3,2 %, что отражает высокую степень хозяйственного освоения территории.

Полевые наблюдения на р. Медяна проводились на гидропостах, заложенных в верхнем и нижнем течении (табл. 1, 2) в 2024-2025 гг. Особое внимание уделялось анализу межгодовых различий, связанных с малоснежной зимой 2025 года, которая может служить ключевым фактором, усиливающим неравномерность сезонного распределения стока.

Таблица 1

Сравнительный анализ расхода воды реки в период весеннего половодья в 2024 и 2025 гг.

Река, гидропост	Расход воды м^3/с, 2024 г.	Расход воды м^3/с, 2025 г.	Изменения в 2025 г. по отношению к 2024г.
Медяна, верхнее течение	6,002	4,605	Уменьшение на 23 %
Медяна, нижнее течение	19,4703	4, 918	Уменьшение 73%
			В среднем уменьшение на 48%

Таблица 2

Сравнительный анализ расхода воды реки в период летней межени в 2024 и 2025 гг.

Река, гидропост	Расход воды м^3/с, 2024 г.	Расход воды м^3/с, 2025 г.	Изменения в 2025 г. по отношению к 2024 г.
Медяна, верхнее течение	0,0751	0,0784	Увеличение на 4%
Медяна, нижнее течение	0,0706	0,2085	Увеличение на 66 %
			В среднем увеличение на 35%

Обсуждение

Полученные результаты демонстрируют выраженное влияние малоснежной зимы в 2024/2025 гг. на сток малых рек лесостепной зоны. Фиксируется резкое сокращение стока р. Медяна в период весеннего половодья в среднем на 48%. Подобные изменения могут быть вызваны резким повышением температуры в зимнее время года, повлекшим увеличение числа оттепелей, вызвавших снижение глубины промерзания почв и сокращением запасов снега к наступлению периода снеготаяния [5]. В свою очередь сокращение глубины промерзания зоны аэрации приводит к снижению объёма поверхностного склонового стока, перераспределению талого стока в сторону подземного и, как следствие, снижению максимального расхода воды в период половодья.

Данный вывод хорошо согласуется с результатами, полученными в ходе гидрологических наблюдений, проведённых в период летней межени. Результаты измерений показали, что минимальный расход воды в реке, характеризующий вклад подземного стока в её питание, увеличился в среднем на 35%. Причиной данных изменений может служить рост инфильтрации, происходящий под воздействием уменьшения глубины промерзания зоны аэрации в зимний период, в результате чего происходит увеличение запасов грунтовых вод в период весеннего половодья. Помимо этого, дефицит снеговых запасов приводит к ослабеванию весеннего половодья, а летняя межень становится менее выраженной, что может быть связано с увеличением доли грунтового питания; это подтверждается выводами В. М. Евстигнеева с соавторами [7] и Н. Л. Фроловой с соавторами [5], которые указывают на рост доли подземного питания в условиях сокращения снегового.

Среднее увеличение летнего стока можно объяснить гидрологическими особенностями р. Медяна, сток в нижнем течении которой внёс доминирующий вклад в обобщённые показатели. Этот факт подчёркивает ограниченность использования средних значений в исследовании динамики годового стока малых рек, так как они маскируют локальные процессы.

Заключение

Анализ изменений максимального и минимального стока реки Медяна показал крайне выраженную чувствительность малых рек лесостепной зоны к климатическим изменениям и сезонным факторам, таким как малоснежные зимы, наблюдаемые на территории Нижегородской области в 2024 – 2025 гг.

Следствием сокращения максимального стока в период весеннего половодья на 48% послужили уменьшение промерзания зоны аэрации под действием повышения температуры, а также значительное сокращение запасов снега. Данные изменения могли стать причиной перераспределения талого стока в сторону подземного,

снижения максимального стока в период половодья и увеличения минимального стока на 35% в период межени.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках реализации гранта Русского географического общества, договор 06/2025-Р от 04.0.2025 «Экспедиция «Плавучий университет Волжского бассейна».

Список литературы

1. Сафина Г. Р., Голосов В. Н. Влияние изменений климата на внутригодовое распределение стока малых рек южной половины Европейской территории России / Сафина, Р. Г, Голосов, Н. В. // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. — 2018. — № 1. — С. 111-125.
2. Бортновский З.В. Влияние ландшафтно-географических факторов на динамику внутригодового распределения стока малых рек (на примере южнотаежного района Вологодской возвышенности) / Бортновский, В. З. — Текст : непосредственный // Географическая среда и живые системы. — 2019. — № 1. — С. 44-52. DOI: 10.18384/2310-7189-2019-1-44-52
3. Шурыгин С. Г. Динамика стока малых рек / С. Г. Шурыгин. — Текст : непосредственный // Актуальные проблемы лесного комплекса. — 2017. — № 48. — С.23-26.
4. Жуков И. А., Айбулатов Д. Н.Тенденции изменений водного режима малых рек бассейна Волги за период инструментальных наблюдений / Жуков, А. И, Айбулатов, Н. Д. — Текст : непосредственный // Вестник Московского университета. Серия 5. География. — 2024. — № 6. — С. 81-90. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.6.7
5. Фролова Н. Л., Киреева М. Б., Агафонова С. А., и др. Внутригодовое распределение стока равнинных рек Европейской территории и его изменение / Н. Л. Фролова, М. Б. Киреева, С. А. Агафонова, и. др. — Текст : непосредственный // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. — 2015. — № 4. — С. 4-20.
6. Зайков, Б. Д. Средний сток и его распределение в году на территории СССР / Б. Д. Зайков. — Ленинград : Гидрометеоиздат , 1946. — 136 с. — Текст : непосредственный.
7. Евстигнеев, В. М., Кислов А.В., Сидорова М.В. Влияние климатических изменений на годовой сток рек Восточно-Европейской равнины в XXI в / В. М. Евстигнеев, А. В. Кислов, М. В. Сидорова. — Текст : непосредственный // Вестник Московского университета. Серия 5. География. — 2010. — № 2. — С. 3-9.

References

1. Safina G. R., Golosov V. N. Vliyanie izmenenii klimata na vnutrigodovoe raspredelenie stoka malykh rek yuzhnoi poloviny Evropeiskoi territorii Rossii [The Effect of Climate Change on the Annual Flow Distribution of Small Rivers in the Southern Half of the European Territory of Russia] Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya Estestvennye nauki. — 2018. — no 1. — pp. 111-125.
2. Bortnovskii Z.V. Vliyanie landshaftno-geograficheskikh faktorov na dinamiku vnutrigodovogo raspredeleniya stoka malykh rek (na primere yuzhnotaezhnogo raiona Vologodskoi vozvyshennosti) [impact of landscape-geographical factors on the intra-annual runoff dynamics of small rivers (on the example of southern taiga, Vologda upland area)]
3. Geograficheskaya sreda i zhivye sistemy. — 2019. — no 1. — pp. 44-52. DOI: 10.18384/2310-7189-2019-1-44-52
4. Shurygin S. G. Dinamika stoka malykh rek [The matters of change of water flow in small rivers are investigated. The dynamics of flow in Lustovka river is studied.]Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa. — 2017. — no 48.
5. Zhukov I. A., Aibulatov D. N.Tendentsii izmenenii vodnogo rezhima malykh rek basseina Volgi za period instrumental'nykh nablyudenii [trends of changes in water regime of small rivers in the Volga river basin during the period of instrumental observations] Vestnik

Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya. — 2024. — no 6. — pp. 81-90. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.6.7
6. Frolova N. L., Kireeva M. B., Agafonova S. A., i dr. Vnutrigodovoe raspredelenie stoka ravninnykh rek Evropeiskoi territorii i ego izmenenie [Lowland rivers runoff within-year distribution and changes on the european territory of Russia] Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie. — 2015. — № 4. — S. 4-20.
7. Zaikov, B. D. Srednii stok i ego raspredelenie v godu na territorii SSSR[Average runoff and its distribution throughout the year in the USSR].Leningrad : Gidrometeoizdat, 1946.136 p.
8. Evstigneev, V. M., Kislov A.V., Sidorova M.V. Vliyanie klimaticheskikh izmenenii na godovoi stok rek Vostochno-Evropeiskoi ravniny v XXI v [INFLUENCE OF CLIMATE CHANGES ON THE ANNUAL RIVER RUNOFF OVER THE EAST EUROPEAN PLAIN IN THE 21st CENTURY] Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya. — 2010. — no 2. — pp. 3-9.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Асташин Андрей Евгеньевич, к.г.н., доцент кафедры географии, географического и геоэкологического образования, Нижегородский государственный педагогический университет имени Козьмы Минина 603005, г. Нижний Новгород, ул.Ульянова,1, доцент кафедры сервиса, Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, 606340, г. Княгинино, Нижегородская область e-mail: astashinfizgeo@yandex.ru

Andrej E. Astashin, Ph.D. in Geography, Associate Professor of the Department of Geography, Geographical and Geoecological Education, Kozma Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University (Minin University), 1, Ulyanov st, Nizhny Novgorod, 603005, Russia; Associate Professor of the Department of Service, Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University, Knyaginino, Nizhny Novgorod Region, 606340, Russia

Пономарев Григорий Дмитриевич, бакалавр, Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина, 603005, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова,1, e-mail: mail@grigoriy-ponomarev.ru

Grigoriy D. Ponomarev, Bachelor's Student, Kozma Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University (Minin University), 1, Ulyanov st, Nizhny Novgorod, 603005, Russia

Нефедова Татьяна Сергеевна, бакалавр, Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина, 603005, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова,1, e-mail: tatana_nefedova3036@mail.ru

Tatiana S. Nefedova, Bachelor's Student, Kozma Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University (Minin University), 1, Ulyanov st, Nizhny Novgorod, 603005, Russia

Гусев Иван Сергеевич, бакалавр, Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина, 603005, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова,1, e-mail: ivanguzevteatral@yandex.ru

Ivan S. Gusev, Bachelor's Student, Kozma Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University (Minin University), 1, Ulyanov st, Nizhny Novgorod, 603005, Russia

Статья поступила в редакцию 27.01.2026; принята к публикации 10.04.2026; опубликована онлайн 20.09.2026. Received 27.01.2026; published online 20.09.2026.

УДК 626.816;627.43;627.82
DOI: 10.37890/jwt.vi88.740

Влияние температурного режима на напряженное состояние блоков бетонирования гидротехнических сооружений

Ю. И. Бик
ORCID: 0009-0008-9070-5210
Н. Н. Фомичева
ORCID: 0000-0003-1278-3199
Сибирский государственный университет водного транспорта, Новосибирск, Россия

Аннотация. При проектировании и строительстве массивных бетонных гидротехнических сооружений необходимо поддерживать температурный режим конструкций, обеспечивающий трещиностойкость. Трещиностойкость зависит от возможности возникновения внутренних растягивающих напряжений. Чтобы исключить это, необходимо выполнить мероприятия по регулированию температурного режима блоков бетонирования, особенно в раннем возрасте. На больших строительных площадках используют различные способы поверхностного ухода. Данная работа посвящена актуальной проблеме в области расчета термонапряженного состояния блоков бетонирования. Выполнены натурные экспериментальные исследования влияния различных способов ухода за бетоном. Выявлено, что наибольший эффект дают увлажнение или полив бетонной поверхности при наличии шатра. Разработана методика расчета нагревания воды при поливе бетонной поверхности свежеуложенного бетона. Получена формула, которая может иметь практическое применение. Предложенная методика учитывает температуру воды полива, площади и температуру воздуха. Результаты лабораторных исследований показали влияние температурной нагрузки и возраста загружения бетонных образцов на их деформативные характеристики: модуль упругости бетона и термический коэффициент линейного расширения. Для обеспечения термической трещиностойкости рекомендовано придерживаться допустимого разогрева бетона.

Ключевые слова: гидротехнические сооружения, трещиностойкость бетона раннего возраста, термонапряженное состояние, способы ухода за бетоном, деформативные характеристики.

Temperature regime impact on the stress state of hydraulic structures concrete blocks

Yu. I. Bik
ORCID: logo 0009-0008-9070-5210
Nyailya N. Fomicheva
ORCID: 0000-0003-1278-3199
Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia

Abstract. When designing and constructing massive concrete hydraulic structures, it is necessary to maintain the temperature regime of structures that ensure crack resistance. Crack resistance depends on the possibility of internal tensile stresses. To eliminate this, it is necessary to take measures to regulate the temperature regime of concrete blocks, especially at an early age. On large construction sites, various methods of surface care are used. This work is devoted to an urgent problem in the field of calculating the thermally stressed state of concrete blocks. Full-scale experimental studies of the effect of various methods of concrete care have been performed. It was revealed that the greatest effect is provided by moistening or watering the concrete surface in the presence of a tent. A method has been developed for calculating the heating of water when watering the concrete surface of freshly laid concrete. A formula has been obtained that may have practical application. The proposed methodology

takes into account the temperature of irrigation water, area and air temperature. The results of laboratory studies showed the influence of the temperature load and the age of loading of concrete samples on their deformative characteristics: the modulus of elasticity of concrete and the thermal coefficient of linear expansion. To ensure thermal crack resistance, it is recommended to adhere to the permissible heating of concrete.

Keywords: hydraulic structures, crack resistance of early-age concrete, thermal stress state, methods of concrete care, deformative characteristics

Введение

В настоящее время ведется строительство крупных бетонных сооружений. Массивные бетонные конструкции особенно часто встречаются в гидротехническом строительстве. Гидротехнические сооружения имеют высокий уровень ответственности и поэтому к ним при проектировании и строительстве предъявляются высокие требования, в частности, это касается трещиностойкости [1,2,3]. Возможное развитие трещин в бетонных массивах определяется термонапряженным состоянием [4,5,6]. Опыт строительства крупных гидроузлов показал, что имели место случаи появления опасных температурных трещин как в строительный период, так и в эксплуатационный период. В качестве примеров можно назвать плотины [1]: Гувера (Hoover Dam), США; Дасу (Dasu Dam), Пакистан; Пикада (Picada Dam), Бразилия; Саяно-Шушенская ГЭС.

Причины возникновения температурных трещин – это усадочные процессы, экзотермия, сопровождающие процессы твердения бетона; разница температуры между ядром и поверхностью; жесткое защемление блоков бетонирования; нарушение технологии при уходе за свежеуложенным бетоном [7,8,9]. Регулирование температурного режима является обязательным в комплексе мероприятий по ограничению трещинообразования [1,10].

Трещиностойкость конструкции определяется сопоставлением напряженного состояния с предельно-допустимыми нормативными значениями. Расчеты термонапряженного состояния массивных бетонных сооружений выполняются с учетом температурных изменений в бетоне, защемления конструкции, изменения деформативных характеристик бетона раннего возраста [11,12,13]. В связи с этим необходимость оценки влияния температурного режима на напряженное состояние блоков бетонирования является *актуальным*.

Цель представленной работы*:* разработать рекомендации по регулированию температурного режима блоков бетонирования, обеспечивающие предотвращение трещинообразования в бетоне раннего возраста, базируясь на разработанной ранее методике расчета термонапряженного состояния блоков бетонирования гидротехнических сооружений в строительный период, и на практических результатах натурных и лабораторных исследований.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие *задачи*:

– Разработать методику расчета нагревания воды при поливе бетонной поверхности.

– Проанализировать влияние различных способов ухода за свежеуложенным бетоном на температурный режим блоков бетонирования. Для решения этого вопроса были проведены комплексные натурные исследования на строящемся гидротехническом объекте.

– Провести экспериментальные лабораторные исследования деформативных характеристик бетона раннего возраста.

Анализируя схему работы блоков бетонирования при послойной укладке бетона, можно блоки рассматривать как плиты, которые имеют большие плановые размеры

по сравнению с высотой [14]. Такой способ укладки бетона в тело плотины применялся при строительстве Андижанского гидроузла.

При послойной укладке основным способом понижения температуры свежеуложенного бетона является полив его поверхности холодной водой, которая нагревается не только за счет отбора тепла от бетона, но и за счет температурного перепада между воздухом и водой. Очень часто этот фактор может иметь существенное значение и должен учитываться при расчете температурного .режима бетона во время строительства.

Материалы и методы

В основу разработки методики расчета нагревания воды при поливе поверхности бетонных блоков положена расчетная схема, включающая следующие предпосылки:

коэффициент теплоотдачи от бетона к воде много больше, чем от воды к воздуху, поэтому перепадом температур между поверхностью бетона и водой можно пренебречь;

толщина слоя воды незначительна и падение температуры в нем можно считать линейным. На рис. 1 представлена расчетная схема перепадов темпера тур и эпюра температуры в воде, отвечающая этим предположениям.

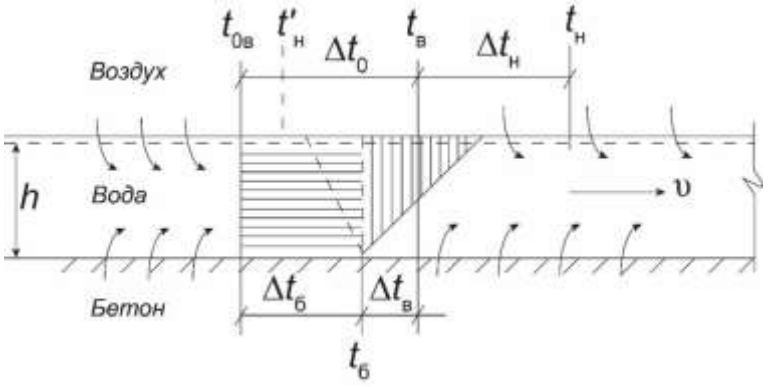


Рис. 1. Расчетная схема перепадов температур и эпюра температуры воды

Здесь $t_{0в}$ — начальная температура воды, $t_в$ — сливающейся с блока, $t_б$ — бетонной поверхности, $t_н$ — воздуха. Однако такая схема будет только до тех пор, пока температура воздуха больше температуры поверхности бетона. Когда они выравняются, нагревание воды за счет воздуха прекратится. При дальнейшем падении температуры воздуха вода начнет охлаждаться (пунктир на эпюре).

Для установления расчетных зависимостей на опытной площадке Андижанской плотины поставлен следующий эксперимент. Взяты два разных по площади блока с одинаковой интенсивностью полива q (л/м^2) и третий с большей. В одно и то же время производились замеры температуры поверхности бетона микротерморезисторами и температуры воды на сливе. Температура поверхности бетона принималась по среднему значению из множества замеров на большой площади.

Исходные данные и данные, полученные из опыта, показаны на схеме (рис. 2).

Площади опытных блоков составляли: I – 32,5 м^2; II – 12,5 м^2; III – 15,0 м^2.

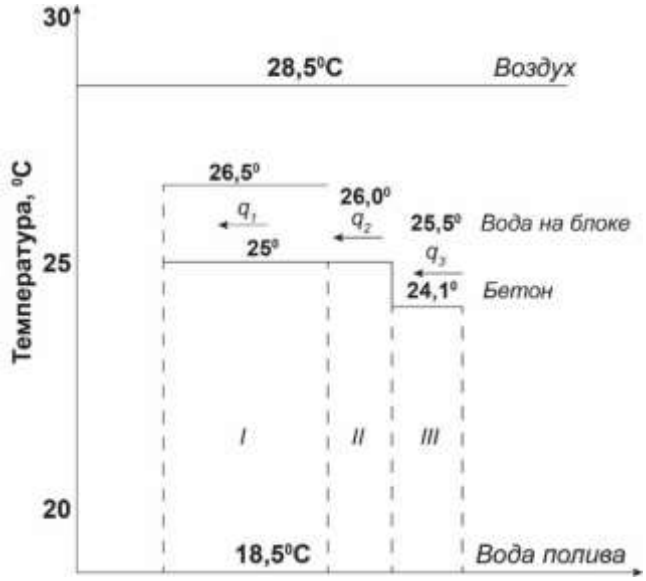


Рис. 2. Опытные данные

Как видим, температура поверхности бетона на блоках I и II одинакова, а сливающейся воды различна. Это происходит из-за того, что площадь поверхности блока I больше площади блока II. При постоянном тепловом потоке от воздуха к воде на большей площади водой поглощается большее количество тепла, а так как скорости потоков при одинаковой интенсивности полива равны, то это соответствует увеличению времени нагревания, и вода на сливе с большей площади имеет большую температуру.

Систему уравнений теплового баланса для части эпюры температуры воды, нагреваемой за счет бетона, и части, нагреваемой за счет воздуха, для блоков I и II можно записать в виде

$$\begin{aligned} \frac{\Delta t_{1б}}{\Delta t_{б}} \cdot \frac{\omega_1}{\omega} + \frac{\Delta t_{2б}}{\Delta t_{б}} \cdot \frac{\omega_2}{\omega} = 1; \\ \frac{\Delta t_{1в}}{\Delta t_{в}} \cdot \frac{\omega_1}{\omega} + \frac{\Delta t_{2в}}{\Delta t_{в}} \cdot \frac{\omega_2}{\omega} = 1, \end{aligned} \qquad (1)$$

где ω, ω_1, ω_2 – полная площадь и ее части с одинаковой интенсивностью полива, $\Delta t_{б}$ — средневзвешенное нагревание воды за счет бетона; $\Delta t_{в}$ — то же, за счет воздуха.

Подставляя опытные данные (рис. 2) и решая эту систему относительно площадей, найдем $\frac{\omega_1}{\omega}$ = 0,72; $\frac{\omega_2}{\omega}$ = 0,28 или ω_1 =32,5 м^2, ω_2 =12,5 м^2, что соответствует эксперименту.

Таким образом, принятую предпосылку можно считать справедливой.

Полагая далее, что нагревание воды пропорционально площадям, а тепловой поток от воздуха к воде пропорционален перепаду $\Delta t_{н}$, по опытным данным (рис. 2) установлена связь между приращением температуры воды полива Δt приходящейся на 1 м^2 поверхности и $\lg \Delta t$. Как и следовало ожидать, характер связи – экспонента вида

$$\Delta t = e^{k\Delta t_i}, \quad (2)$$

где k — опытный коэффициент, который зависит от различных факторов (скорости ветра, толщины слоя воды, солнечной радиации и т. п.).
Для данного опыта формула (2) приобретает вид

$$10^3 \Delta t = e^{0,8\Delta t_i} \text{ C}^\circ/\text{м}^2 . \quad (3)$$

На блоке III наблюдается падение как температуры поверхности бетона, так и температуры воды на сливе (рис. 2).

Падение температуры поверхности бетона пропорционально изменению интенсивности полива и равно

$$\frac{q_3}{q_1} = \frac{\Delta t_{1б}}{\Delta t_{3б}} = \frac{6,2}{5,3} = 1,17 . \quad (4)$$

Изменение температуры воды на блоке происходит по двум причинам. За счет увеличения перепада $\Delta t_н$ на 3°С вода по формуле (3) должна нагреться на $11 \cdot 10^{-3}$ °С/м^2, что на всю площадь даст 1,65°С.

Однако за счет увеличения интенсивности полива скорости возрастут, время стояния воды на блоке уменьшится, и вода нагреется меньше на величину, пропорциональную увеличению расхода (4) н составит 1,4° С, что соответствует результату эксперимента.

Таким образом, все принятые предпосылки имеют место, а само явление нагревания воды на блоке за счет температуры воздуха должно учитываться при расчете охлаждения бетона. Во-первых, оно может составлять значительную долю от величины нагревания воды за счет отбора тепла от бетона (в приведенном примере больше 10%). Во-вторых, температурный перепад между .водой и воздухом с ростом интенсивности полива также растет, следовательно, и интенсивность нагревания веды за счет воздуха увеличивается, то есть увеличиваются непроизводительные затраты воды.

Также целью проведения натурных исследований является оценка влияния различных способов ухода за бетоном на температурный режим и как следствие – напряженное состояние блоков бетонирования в строительный период.

Методика включала измерения температуры бетона и деформаций в блоках бетонирования, измерения метеорологических характеристик и наблюдения за трещинообразованием. Точность измерения температуры ≈ 0,1°С; для измерения деформаций использовались телетензометры БТ300М, разработанные НИСом Гидропроекта. Чувствительность – 0,00065 мм. Датчики закладывались во время бетонирования блоков. Исследования были проведены в условиях, максимально приближенных к производственным: одна площадка располагалась под шатром, другая – без шатра. Блоки имели размеры 2×2 м и выполнялись в теплоизолированной опалубке. Высота блоков 0,5; 0,75 и 1,0 м. В рамках эксперимента на опытных площадках применялись различные способы ухода, включая полив и увлажнение.

Использование шатра и поверхностного ухода можно оценить по графикам (рис. 3, 4 и 5).

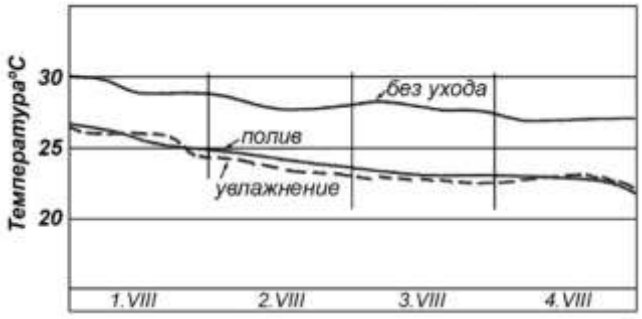


Рис.3. Распределение температур в центре блоков высотой 1,0 м (под шатром)

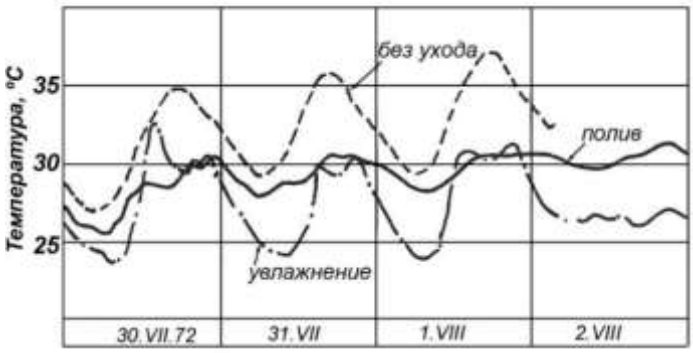


Рис. 4. Колебания температур на поверхности бетонных блоков высотой 0,5 м (под шатром)

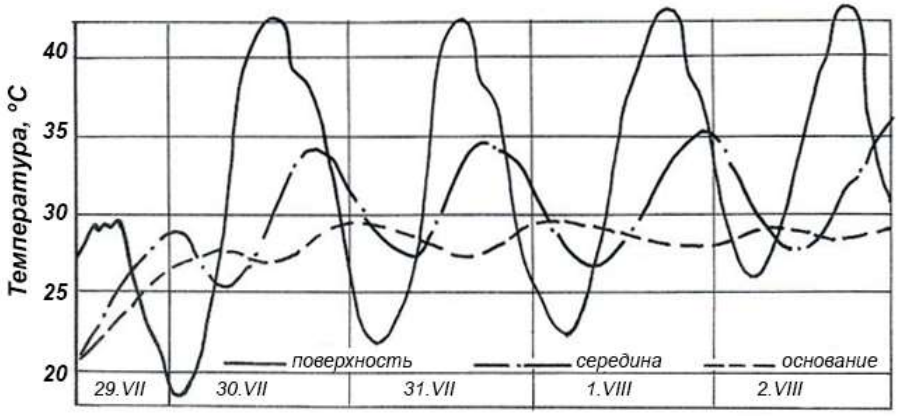


Рис.5. Изменения температур бетона в блоке высотой 0,5 м без ухода, без шатра

Во время проведения исследований температура воздуха колебалась от 16°С до 35°С, а воды полива: от 20°С до 24°С.

Проведенный анализ позволил установить, что шатер и полив под пленкой или мешковиной являются эффективными средствами понижения температуры поверхности бетона. Изучение деформированного состояния бетона раннего возраста проводилось в двух опытных створах (рис.6). Принятое расположение датчиков температуры и телетензометров позволило выявить влияние шатра и полива на температурный режим и деформированное состояние бетона.

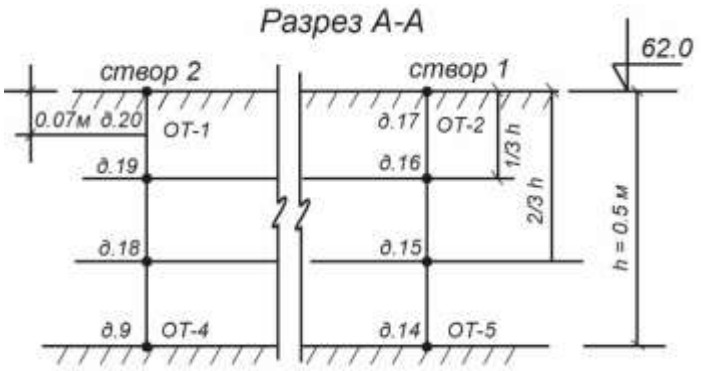


Рис. 6. Схема размещения датчиков температуры и телетензометров,
створ 2 – полив, шатер; створ 1 – без ухода
д.20 – датчик температуры №20; Т-2 – телетензометр №2

В реальных условиях при укладке бетона каждый блок имеет свои характеристики $E(t)$ – модуль упруго-мгновенных деформаций и F_0 – поперечный размер (площадь торца), а соседние блоки соответственно $E_c(t)$ и F_c. В зависимости от сочетания указанных параметров рассматриваемый блок может работать как блок со свободными или жесткозащемленными торцами, так и – с упругоподатливыми связями. Для учета этого фактора при исследовании деформативных характеристик бетона раннего возраста была специально разработана установка [15]. Эта экспериментальная установка позволяет изменять температурный режим бетонных образцов и обеспечивать условия опирания блока по торцам, соответствующих упругоподатливым связям.

Методика проведения экспериментальных лабораторных исследований включала моделирования состава бетона, создание требуемого температурного режима, измерения деформаций образцов, определение нарастания прочности бетона, модуля упруго-мгновенных деформаций бетона и температурного коэффициента линейного расширения [16].

Состав модельного бетона по весу 1:2,6:3,2 с водоцементным отношением 0,52. Размеры исследуемых бетонных образцов назначены исходя из требований, чтобы наименьший размер был в три раза больше наибольшей крупности заполнителя. Были приняты размеры исследуемых бетонных образцов $20\times20\times80$ см, каждому из которых присваивался соответствующий шифр. Подъем температуры образца осуществлялся в разном возрасте от 1 до 8 суток.

Результаты

По измеренным деформациям в натурных условиях вычислены напряжения (рис.7).

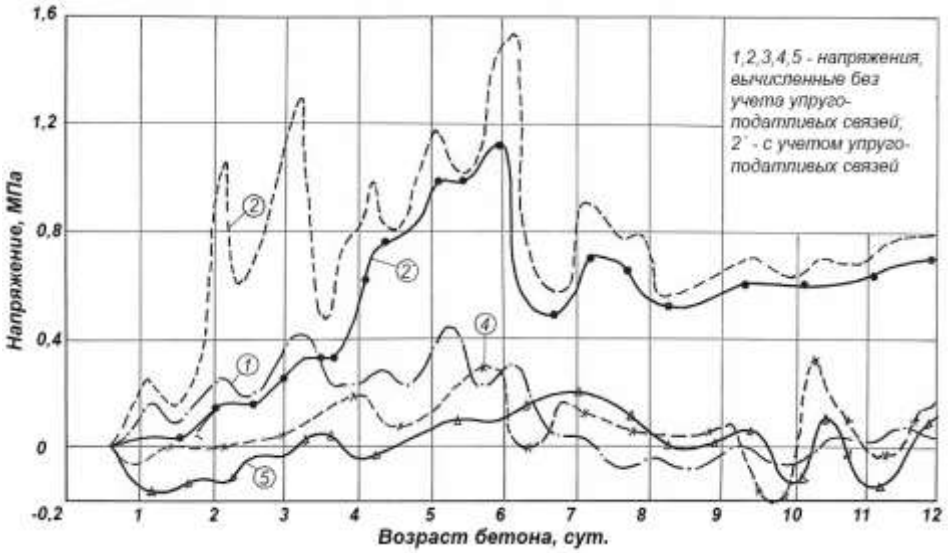


Рис.7. Напряжения в контрфорсе 22 секции Андижанской плотины в строительный период
1,4 – датчики в блоке с поливом; 2, 5 – в блоке без ухода

Результаты лабораторных исследований показали влияние температурного режима и возраста бетона на развитие деформаций и напряжений (рис.8).

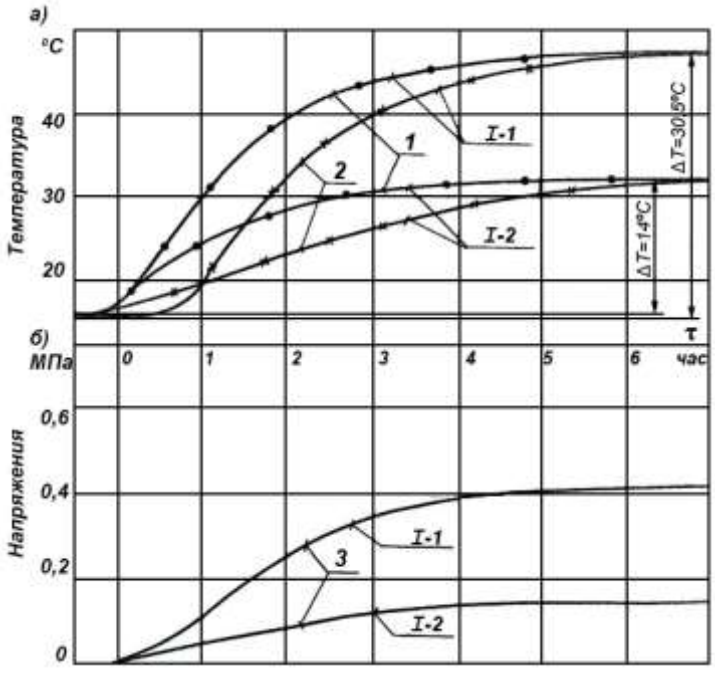


Рис. 8. Термонапряженное состояние опытных блоков I-1 и I-2, загруженных температурной нагрузкой в возрасте 1 суток
1, 2 – экспериментальные значения температур поверхности и центра образца;
3 – средние значения напряжений

Обсуждения

На примере образца I-1 видим, что температура поднялась с 17°С до 47,5°С за 7 часов, и уже через 7 часов после начала подъема температур в каждой точке сечения температура составляла 47,5°С. Графики позволяют заключить, что ход кривой температуры поверхности по виду приближается к экспоненте.

В первые дни после укладки бетона интенсивно изменяются все его основные свойства, в том числе и предельная растяжимость. Если интенсивность увеличения температурных напряжений σ(*t*) не превысит скорости роста предельной растяжимости $V\varepsilon_{\text{пред.}}$, то опасность образования трещин можно считать исключенной.

Исходя из этого, допустимая скорость остывания может быть найдена из уравнения

$$V_{\text{т}} \le \frac{V\varepsilon_{\text{пред.}}}{\alpha K_{\text{з}} K_{\text{р}}\left(t,\tau\right)}, \tag{5}$$

а расчет допустимого разогрева бетона над среднеустановившейся температурой из условий трещиностойкости проводится по формуле

$$\Delta T_{\text{доп.}} \le \frac{\varepsilon_{\text{пред.}}\left(1-\nu\right)}{\alpha K_{\text{р}}\left(t,\tau\right)K}, \tag{6}$$

где $V_{\text{т}}$ – понижение температуры бетона за одни сутки; α – температурный коэффициент линейного расширения; $K_{\text{з}}$ – коэффициент защемления блока в основание; $K_{\text{р}}\left(t,\tau\right)$ – коэффициент релаксации напряжений; $\varepsilon_{\text{пред.}}$ – предельная растяжимость бетона; K – коэффициент запаса по трещиностойкости, принимаемый 1,2÷1,3.

Заключение

1. Выполненные экспериментальные исследования показали значительное влияние температурного режима бетона и его возраста на термонапряженное состояние.

2. Предложена методика расчета нагревания воды полива при использовании этого способа ухода за свежеуложенным бетоном.

3. Представлены материалы натурных исследований влияния различных способов ухода за бетоном на его температурный режим и напряженное состояние.

4. Лабораторные экспериментальный исследования показали влияние температурной нагрузки и возраста бетона на деформативные характеристики.

5. Даны рекомендации по регулированию температурного режима с целью недопущения трещинообразования путем соблюдения условий по поддержанию допустимой скорости остывания и допустимого разогрева бетона.

Список литературы

1. Макеева А.В., Семенов К.В., Макеев А.А., Амелина А.В. Трещиностойкость массивных бетонных конструкций в строительный период с учетом температурных воздействий // Вестник БГТУ им. Шухова. – 2019. №8. С. 30-37. DOI:10.34031/article_5d49408e0e0b61/97206550
2. Александровский С. В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на температурные и влажностные воздействия с учетом ползучести.– М.: Стройиздат, 2004. 712 с.
3. Стручкова А.Я., Барабанщиков Ю.Г., Семенов К.В., Шайбакова А.А. Тепловыделение цемента и расчеты трещиностойкости бетонных массивов // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 2(78). С. 128–135. doi: 10.18720/MCE.78.10.

4. Добрецова И.В., Галактионов Д.Е. Температурный режим и термонапряженное состояние массивных железобетонных элементов конструкций АЭС при их возведении. СПб: Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники им. Веденеева. 2013, с.55-60.
5. Семенов К.В., Барабанщиков Ю.Г. Термическая трещиностойкость массивных бетонных фундаментных плит и ее обеспечение в строительный период // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. №2(17), с.125-135.
6. Корянова Ю.И., Несветаев Г.В., Чепуренко А.С., Сухин Д.П. К вопросу моделирования температурных напряжений при бетонировании массивных железобетонных плит // Инженерный вестник Дона. – 2022. №7. URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7691
7. Барабанщиков Ю.Г., Семенов К.В., Стручкова А.Я., Мановицкий С.С. Оценка учета влияния температуры твердения на процесс тепловыделения в расчетах термонапряженного состояния массивных бетонных и железобетонных конструкций в строительный период // Приволжский научный вестник № 1 (65) – 2017. С. 11-17.
8. Стародубцев А.А. Анализ тепловыделения бетонных конструкций в стадии набора прочности / Стародубцев А.А. – DOI: 10.18411.ектшщ-04-2022-91 // Тенденции развития науки и техники. – 2022. - №84-2. – С.164-167.
9. Лазовский Д.Н., Тур В.В., Глухов Д.О., Лазовский Е.Д. Учет ползучести и усадки бетона по СП 5.03.01-2020 при расчете железобетонных конструкций на основе деформационной расчетной модели // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2021. С. 7-12.
10. Несветаев Г. В. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния массивной железобетонной фундаментной плиты в ранний период твердения / Г. В. Несветаев, Ю. И. Корянова, Д. П. Сухин // Вестник Евразийской науки. — 2023. — Т 15. — № 3. — URL: https://esj.today/PDF/17SAVN323.pdf (дата обращения: 02.06.2026).
11. Несветаев Г.В., Чепуренко А.С., Корянова Ю.И., Сухин Д.П. Оценка некоторых методик для расчета температурных напряжений при бетонировании массивных железобетонных фундаментных плит // Инженерный вестник Дона. – 2022. №7. URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7817
12. Белов А. В. Температурные напряжения в бетонной призме прямоугольного поперечного сечения.– Изв. ВНИИГ, т. 51, 2013. С. 55-60.
13. Гинзбург С.М., Шейнкер Н.Я., Добрецова И.В., Вознесенская Н.В. Исследования по термике бетонных сооружений. СПб: Известия ВНИИГ. Том 263. 2012. С.87-97.
14. Зубков В.И., Фомичева Н.Н. Исследование термонапряженного состояния бетонных блоков плотины в строительный период. – В кн.: Новое в технологии бетона. Материалы VII Всесоюзной конференции молодых ученых и специалистов. – М.: Стройиздат, 1975, с.92-93.
15. Фомичева Н.Н., Фомичев Б.С. Экспериментальная установка для исследования термонапряженного состояния бетона раннего возраста // Изв. Вузов / Строительство и архитектура, 1982. - №8. – С.128-130.
16. Фомичева Н.Н. Деформативные характеристики бетона в его раннем возрасте // Сибирский научный вестник. ISBN 978-5-8119-0358-0. Вып.XII. – Новосибирск, 2009. – С. 217-221.

References

1. Makeeva A.V., Semenov K.V., Makeev A.A., Amelina A.V. Crack resistance of massive concrete structures during the construction period, taking into account temperature effects. Vestnik BSTU im. Shukhov. – 2019. No. 8. pp. 30-37. DOI:10.34031/article_5d49408e0e0b61/97206550
2. Alexandrovsky S. V. Calculation of concrete and reinforced concrete structures for temperature and humidity effects, taking creep into account. Moscow: Stroyizdat, 2004. 712 p.
3. Struchkova A.Ya., Barabanshchikov Yu.G., Semenov K.V., Shaibakova A.A. Thermal separation of cement and calculations of crack resistance of concrete massifs // Civil Engineering magazine. 2018. No. 2(78). pp. 128-135. doi: 10.18720/MCE.78.10.
4. Dobretsova I.V., Galaktionov D.E. Temperature regime and thermally stressed state of massive reinforced concrete elements of NPP structures during their construction. Saint Petersburg: All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering named after Vedeneyeva. 2013, pp.55-60.

5. Semenov K.V., Barabanshchikov Yu.G. Thermal crack resistance of massive concrete foundation slabs and its provision during the construction period // Construction of unique buildings and structures. – 2014. №2(17), pp.125-135.
6. Koryanova Yu.I., Nesvetaev G.V., Chepurenko A.S., Sukhin D.P. On the issue of modeling temperature stresses during concreting of massive reinforced concrete slabs // Engineering Bulletin of the Don. – 2022. №7. URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7691
7. Barabanshchikov Yu.G., Semenov K.V., Struchkova A.Ya., Manovitsky S.S. Assessment of the effect of the hardening temperature on the heat release process in calculations of the thermal state of massive concrete and reinforced concrete structures during the construction period // Privolzhsky Scientific Bulletin No. 1 (65) – 2017. pp. 11-17.
8. Starodubtsev A.A. Analysis of heat generation of concrete structures at the stage of strength gain / Starodubtsev A.A. – DOI: 10.18411.ectsh-04-2022-91 // Trends in the development of science and technology. – 2022. - No. 84-2. – pp.164-167.
9. Lazovsky D.N., Tur V.V., Glukhov D.O., Lazovsky E.D. Accounting for creep and shrinkage of concrete according to SP 5.03.01-2020 when calculating reinforced concrete structures based on a deformation calculation model // Bulletin of the Brest State Technical University. - 2021. pp. 7-12.
10. Nesvetaev G. V. Experimental study of the stress-strain state of a massive reinforced concrete foundation slab in the early period of hardening / G. V. Nesvetaev, Yu. I. Koryanova, D. P. Sukhin // Bulletin of Eurasian Science. — 2023. — T 15. — No. 3. — URL: https://esj.today/PDF/17SAVN323.pdf (date of notification: 06/02/2026).
11. Nesvetaev G.V., Chepurenko A.S., Koryanova Yu.I., Sukhin D.P. Evaluation of some techniques for calculating temperature stresses during concreting of massive reinforced concrete foundation slabs // Engineering Bulletin of the Don. – 2022. No. 7. URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7817
12. Belov A.V. Temperature stresses in a rectangular cross-section concrete prism.– VNIIG Publishing House, vol. 51, 2013. pp. 55-60.
13. Ginzburg S.M., Sheinker N.Ya., Dobretsova I.V., Voznesenskaya N.V. Research on the thermology of concrete structures. St. Petersburg: Izvestiya VNIIG. Volume 263. 2012. pp.87-97.
14. Zubkov V.I., Fomicheva N.N. Investigation of the thermally stressed state of the concrete blocks of the dam during the construction period. – In: New in concrete technology. Materials of the VII All-Union Conference of Young Scientists and Specialists. Moscow: Stroyizdat, 1975, pp.92-93.
15. Fomicheva N.N., Fomichev B.S. Experimental installation for studying the thermally stressed state of early–age concrete // Izv. Vuzov / Construction and Architecture, 1982. - No. 8- P.128-130.
16. Fomicheva N.N. Deformative characteristics of concrete in its early age // Siberian Scientific Bulletin. ISBN 978-5-8119-0358-0. Issue XII. – Novosibirsk, 2009. – pp. 217-221.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Бик Юрий Игоревич – д.т.н., профессор, зав. кафедрой СПВПиГТС, Сибирский Государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «СГУВТ»), 630099, Новосибирская область, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: yibik@mail.ru

Yuri I. Bik– Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of SPVPiGTS, Siberian State University of Water Transport (FSBI VO «SGUVT»), 630099, Novosibirsk region, Novo-Sibirsk, Shchetinkina str., 33, e-mail: yibik@mail.ru

Фомичева Няиля Николаевна, доцент кафедры Строительного производства, водных путей и гидротехнических сооружений, к.т.н., доцент, Сибирский Государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «СГУВТ»), 630099, Новосибирская область, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: ginelli1949@mail.ru.

Nyailya N. Fomicheva, Associate Professor of the Department of Construction Production, Waterways and Hydraulic Structures, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Siberian State University of Water Transport (FSBI VO «SGUVT»), 630099, Novosibirsk region, Novosibirsk, Shchetinkina str., 33, e-mail: ginelli1949@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 16.06.2026; принята к публикации 10.08.2026; опубликована онлайн 20.09.2026. Received 16.06.2026; published online 20.09.2026.

УДК 004.942
DOI: 10.37890/jwt.vi88.726

Исследование влияния скорости судна на русловой процесс в канале разной глубины по результатам математического моделирования гидравлики потока

С.С. Герасимов
ORCID: 0009-0008-6699-4243
А.Н. Ситнов
Волжский государственный университет водного транспорта,
г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация: в настоящее время на территории Российской Федерации существует и функционирует единая глубоководная система (ЕГС), включающая в себя большое количество судоходных рек и каналов. Часть из них пересекают магистральные трубопроводы, которые, как показывает практика, зачастую имеют небольшую глубину заложения, что впоследствии приводит к возникновению отклонений планово-высотного положения трубопровода. В связи с зарегулированностью ряда судоходных каналов, что сопровождается отсутствием естественного течения, одним из факторов, влияющих на размыв дна канала, является прохождение судов. Главным образом на гидродинамические процессы оказывает влияние скорость движения судна. Оценить влияние судоходства на изменение интенсивности донной эрозии в канале возможно с помощью математического моделирования. В статье представлены результаты математического моделирования движения с разной скоростью судна проекта 507Г-020-012 по каналу при разной его глубине.

Ключевые слова: безопасность судоходства, математическое моделирование, вычислительная гидродинамика, судоходный канал

Study of the influence of vessel speed on the channel process in a channel of different depths based on the results of mathematical modeling of flow hydraulics

Sergey S. Gerasimov
ORCID: 0009-0008-6699-4243
Aleksandr N. Sitnov
Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract: Currently, a unified deepwater system (UDS) exists and operates within the Russian Federation, encompassing a large number of navigable rivers and canals. Some of these are crossed by main pipelines, which, as practice shows, often contain some embedded foundations, which subsequently leads to deviations in the pipeline's planned elevation. Due to the over-regulation of a number of shipping canals, which is accompanied by a lack of natural water flow, one of the factors influencing channel bottom erosion is the passage of vessels. Hydrodynamic processes primarily affect vessel speed. The impact of shipping on changes in the degree of bottom erosion in the canal can be assessed using mathematical modeling. This article presents the results of mathematical modeling of Project 507G-020-012 movement at different speeds along the canal, with varying levels of water content.

Keywords: shipping safety, mathematical modeling, computational fluid dynamics, shipping channel

Введение

Судоходство на внутренних водных путях (ВВП), в частности, на судоходных каналах, оказывает активное влияние на русловые переформирования за счет возникновения дополнительных гидродинамических процессов под днищем судна и в прилежащих областях [1], [2]. В связи с отсутствием на зарегулированных каналах естественного течения, интенсивность гидродинамических процессов зависит главным образом от скорости движения судна. Количественно и качественно определить характер взаимосвязи между скоростью судна в канале и скоростью движения воды вблизи дна с целью последующего определения безопасной скорости судна можно с помощью выполнения математического моделирования. В данной статье описана математическая модель, а также представлены полученные результаты и сделаны общие выводы касательно вышеупомянутого вопроса.

Материалы и методы

Для определения безопасного скоростного режима движения судов в канале была разработана математическая модель, которая принципиально состоит из двух элементов: судно и канал. Судно состоит из корпуса и двух движителей (гребных винтов) с внешним диаметром винтов 1,8 м. Канал протяженностью 500-2000 м, шириной 50,1 м, глубиной: 4,5, 5, 5,5, 7 и 10 м. Для описания турбулентных процессов, возникающих в расчетной области при движении судна и работе гребных винтов, была выбрана модель турбулентности $K-Epsilon$[3].

В качестве расчетного используется судно проекта 507Г-020-012, основные характеристики которого приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики судна проекта 507Г-020-012

Параметр	Значение
Длина, м	135,0
Ширина, м	16,5
Осадка, м	3,5
Водоизмещение, т	6710
Количество гребных винтов, шт	2
Диаметр гребного винта, м	1,8

Геометрия расчетного судна представлена на рисунке 1.

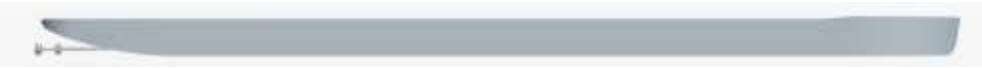


Рис. 1. Общая конфигурация судна

Для реализации математического моделирования движения судна определена взаимосвязь скорости судна на тихой воде и скорости вращения обоих его движителей. Такая взаимосвязь имеет вид кривой, которая строится на основе результатов тяговых расчетов. Для судна проекта 507Г-020-012 указанная зависимость уже имеется и представлена на рисунке 2.

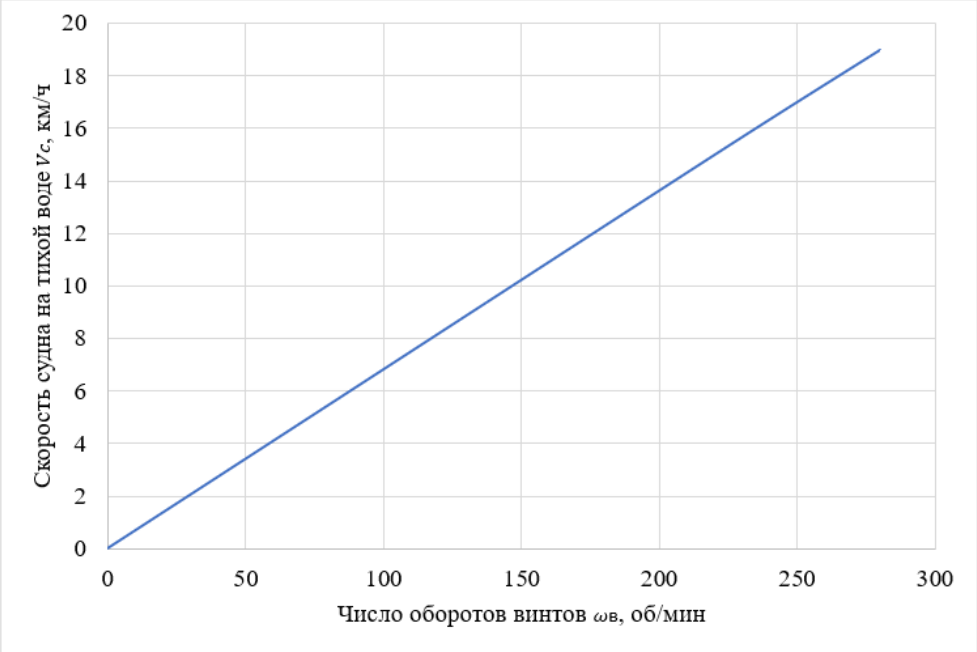


Рис. 2. Зависимость $V_c = f(\omega_в)$

По данному графику получены значения скорости движения судна на тихой воде при конкретной скорости вращения гребных винтов. Значения скоростей, используемых в вариациях М1-М5, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Значения скорости движения судна при разных скоростях вращения винта

Наименование вариации	Скорость судна на тихой воде, км/ч	Обороты винта, об/мин	Обороты винта, рад/с
М1	0,60	8,70	0,91
М2	1,00	14,59	1,53
М3	2,50	36,68	3,84
М4	4,00	58,77	6,15
М5	10,00	147,14	15,41

На основе данных, приведенных в таблице 2, для каждой глубины канала разработано и рассчитано несколько вариаций математической модели, обозначенных М1-М5, каждая из которых имитирует движение судна с заданной скоростью в канале. Цель данного математического моделирования заключается в исследовании гидродинамических процессов, возникающих вблизи дна канала при прохождении судов, для чего создан контрольный индикатор в виде плоского сечения, расположенного на расстоянии 0,1 м от дна.

В процессе моделирования программа фиксировала максимальную скорость движения воды v_{max} в заданном контрольном индикаторе, что позволяет сделать выводы о её изменении вблизи дна канала при прохождении судна.

Результаты

В результате выполнения математического моделирования для каждой глубины канала получены графики изменения максимальной скорости течения v_{max} вблизи дна при разной скорости движения судна v_c (рисунок 3, 4).

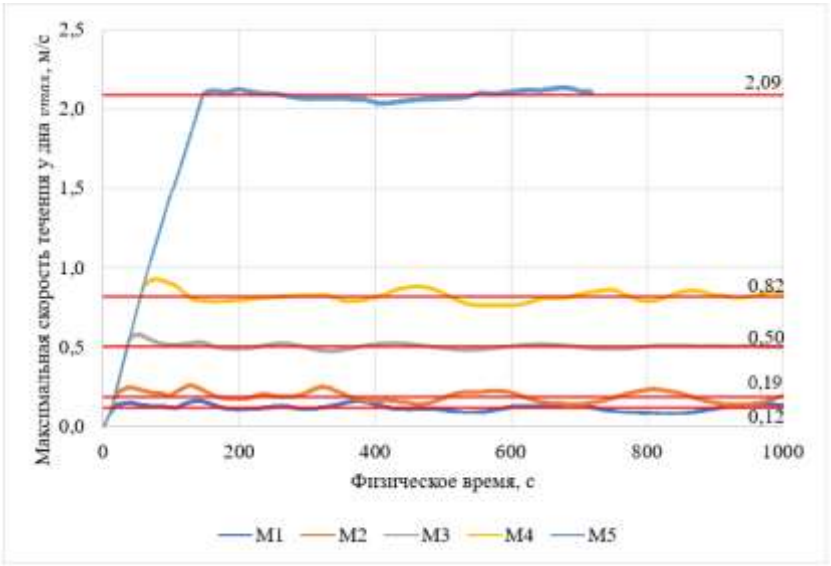


Рис. 3. Графики изменения максимальной скорости течения у дна канала глубиной 4,5 м

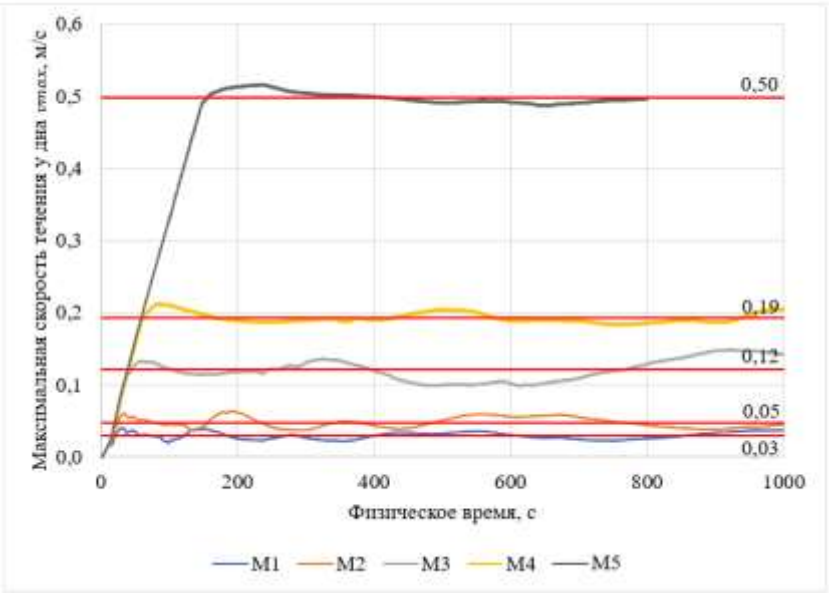


Рис. 4. Графики изменения максимальной скорости течения у дна канала глубиной 10 м

На рисунках 3, 4 приведены графики для граничных из принятых в расчетах значений глубины 4,5 м и 10 м. По ним следует, что скорость течения у дна

увеличивается в разы при возрастании скорости движения судна, но уменьшается с ростом глубины канала, причем наиболее сильное влияние на характер изменения скорости течения оказывает скорость судна. Аналогичные тенденции изменения скорости течения проявились при промежуточных глубинах канала 5, 5,5 и 7 метров.

Мониторинг изменения скалярного скоростного поля потока в процессе моделирования осуществлялся с помощью специальных сцен, одна из которых представлена на рисунке 5.

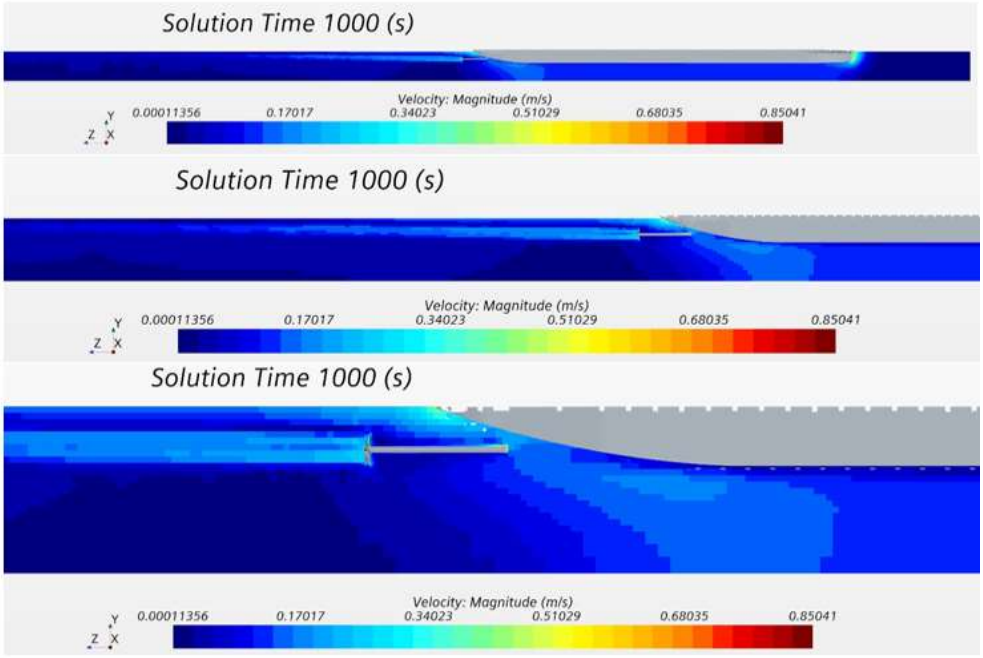


Рис. 5. Скалярное скоростное поле потока на момент времени 1000 с

По полученным графикам определены осредненные значения максимальной скорости течения вблизи дна канала v_{max} при разных соотношениях осадки судна к глубине потока T/H, именуемых нами как коэффициент стеснения потока под днищем $K_{ст}$ и при коэффициентах стеснения живого сечения канала Ω, определяемых отношением площади погруженной части судна к площади поперечного сечения канала. Результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты математического моделирования

Вариация модели	Скорость судна V_c		Максимальная скорость течения вблизи дна канала v_{max}, м/с / $\frac{v_{max}}{v_c}$				
			Глубина канала, м ($K_{ст}$, Ω)				
	м/с	км/ч	4,5 ($K_{ст}$=0,78, Ω=0,26)	5,0 ($K_{ст}$=0,70, Ω=0,23)	5,5 ($K_{ст}$=0,64, Ω=0,21)	7,0 ($K_{ст}$=0,50, Ω=0,17)	10,0 ($K_{ст}$=0,35, Ω=0,12)
M1	0,17	0,61	0,12/0,71	0,09/0,53	0,07/0,41	0,05/0,29	0,03/0,18
M2	0,28	1,01	0,19/0,68	0,15/0,54	0,13/0,46	0,08/0,29	0,05/0,18
M3	0,69	2,48	0,50/0,72	0,35/0,51	0,30/0,43	0,20/0,29	0,12/0,17
M4	1,11	4	0,82/0,74	0,58/0,52	0,49/0,44	0,33/0,30	0,19/0,17
M5	2,78	10	2,09/0,75	1,52/0,55	1,23/0,44	0,85/0,31	0,50/0,18

Из таблицы 3 следует, что динамика изменения коэффициентов $K_{ст}$ и Ω практически одинакова, а отношение $\frac{K_{ст}}{\Omega}$ при разных глубинах канала изменяется незначительно, что позволяет использовать далее при оценке влияния на скорость течения из двух этих коэффициентов только $K_{ст}$.

По результатам моделирования построены графики зависимости $v_{max} = f(v_c)$, на которых моделируемые кривые аппроксимируются степенными функциями вида $v_{max} = a \cdot v_c^b$ при разной стесненности потока под днищем $K_{ст}$ (рисунок 6) и $v_{max} = f(K_{ст})$ (рисунок 7). На рисунке 6 пунктирными линиями обозначены границы областей безопасных для размыва грунта скоростей движения судна.

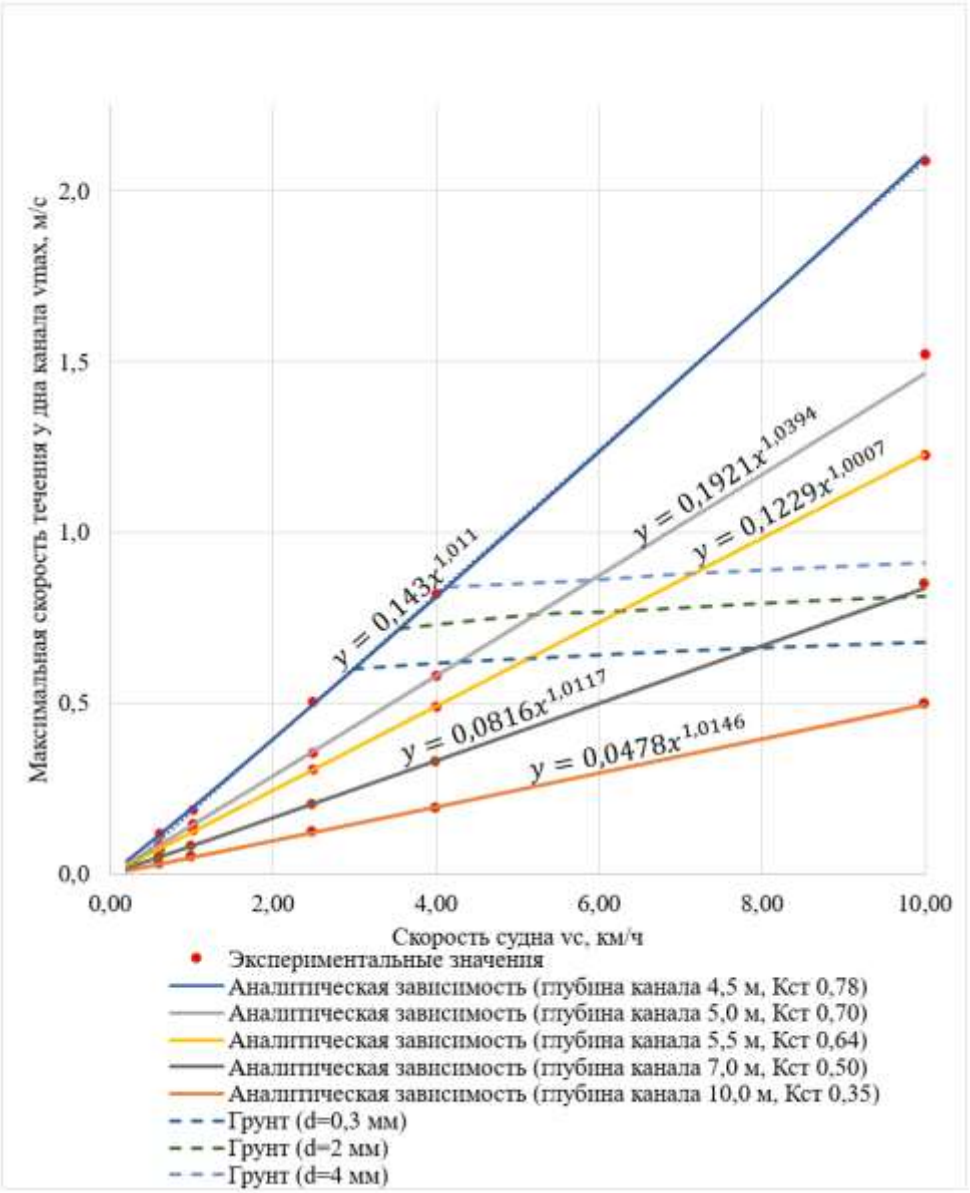


Рис. 6. Аналитические зависимости $v_{max} = f(v_c)$ при разных $K_{ст}$

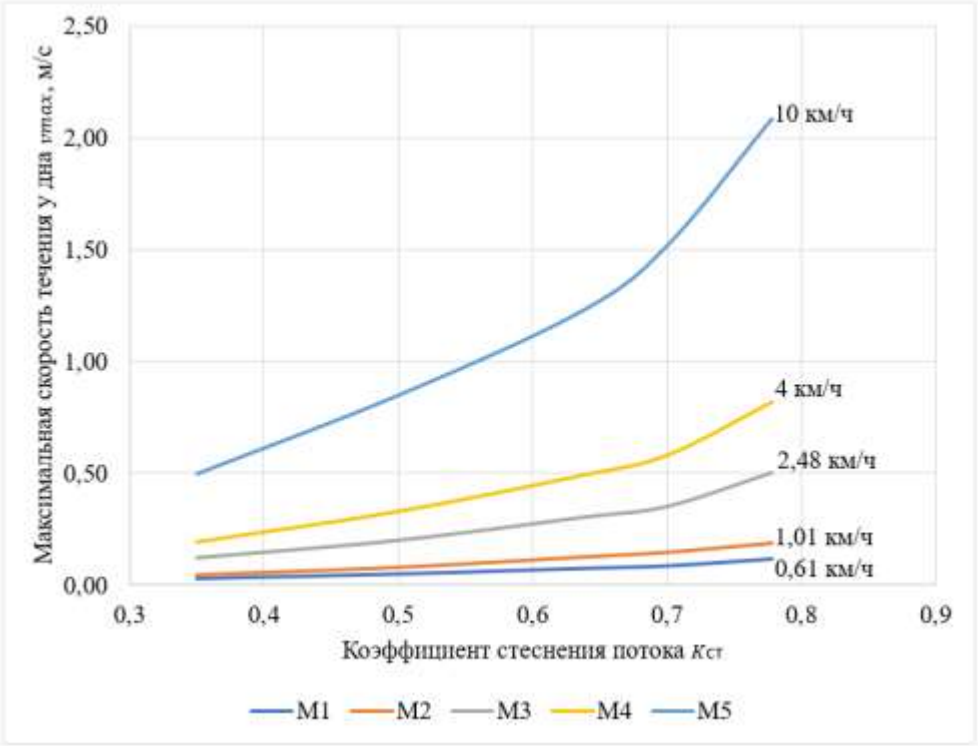


Рис. 7. Зависимости $v_{max} = f(K_{ст})$

Из данных таблицы 3 и рисунков 6, 7 следует, что скорость течения у дна возрастает с увеличением скорости судна и повышением стесненности потока, причем влияние этих факторов проявляется с разной интенсивностью. Так, при одной и той же скорости судна, максимальная скорость течения у дна примерно в 4 раза выше при максимальном стеснении потока ($K_{ст}$=0,78) по сравнению с минимальным стеснением потока ($K_{ст}$=0,35), а при одной и той же величине стесненности потока при увеличении скорости судна от 0,61 до 10 км/ч максимальная скорость течения у дна возрастает примерно в 17 раз.

Особенностью полученных результатов является относительное постоянство соотношения максимальной скорости течения вблизи дна и скорости судна. Таким образом, с увеличением скорости судна увеличивается и значение максимальной скорости течения у дна, однако их отношение v_{max}/v_c практически не меняется при конкретном значении $K_{ст}$. При высокой стесненности потока ($K_{ст}$=0,78) это отношение составило 0,68-0,75, при самой малой стесненности потока ($K_{ст}$=0,35) это отношение составило 0,17-0,18. Такая особенность соотношений скоростей позволяет в дальнейшем использовать её в аналитической оценке влияния скоростного режима на русловые процессы и безопасность судоходства.

Для оценки влияния скорости судна и стеснения потока под днищем на максимальную скорость течения у дна выполнен корреляционно-регрессивный анализ связи исследуемых факторов, который показал, что на скорость течения у дна наибольшее влияние оказывает скорость судна (парный коэффициент корреляции составляет 0,84), меньшее влияние оказывает стесненность потока под днищем

(парный коэффициент корреляции составляет 0,38), а также общая стесненность живого сечения канала (парный коэффициент корреляции составляет 0,38). Совокупное влияние трех факторов v_c, $K_{ст}$ и Ω в основном определяет скорость течения у дна v_{max} (множественный коэффициент корреляции 0,93).

Для массива статистических параметров, характерных для принятых условий прохождения судна проекта 507Г-020-012 с осадкой 3,5 м по каналу при глубинах 4,5-10 м, расчетных максимальных скоростей течения у дна, заданных значениях скоростей судна и стесненности потока под днищем судна получено уравнение регрессии вида $v_{max} = a_0 + a_1 \cdot v_c + a_2 \cdot K_{ст} + a_3 \cdot \Omega$, используя которое возможно, варьируя параметрами v_c, $K_{ст}$ и Ω, получить величину v_{max} и оценить её влияние на размыв дна, а также обосновать величину безопасной скорости судна $v_{без}$.

Для этого, пользуясь нормативными материалами [4], в таблице 4 приведены значения допустимых неразмывающих скоростей течения для грунтов, состоящих преимущественно из частиц диаметром 4, 2 и 0,3 мм соответственно при глубинах потока 4,5 м, 5 м, 5,5 м, 7 м и 10 м [5]. Приравнивая их к величине v_{max} можно из уравнения регрессии, разработанного для соответствующей выборки параметров, или по аналитическим зависимостям (рисунок 6) получить безопасную для размыва грунта скорость судна $v_{без}$ (таблица 4).

Таблица 4

Безопасные скорости движения судна по каналу разной глубины

Вид грунта	Глубина потока H, м	Коэффициент стесненности $K_{ст}$	Допустимая неразмывающая скорость потока, м/с	Безопасная скорость судна $v_{без}$	
				м/с	км/ч
Гравий средний (d=4 мм)	4,5	0,78	0,84	1,15	4,15
	5,0	0,70	0,86	1,64	5,90
	5,5	0,64	0,88	1,99	7,18
	7,0	0,50	0,92	3,06	11,0
	10,0	0,35	0,99	5,53	19,90
Гравий мелкий (d=2 мм)	4,5	0,78	0,72	0,99	3,56
	5,0	0,70	0,76	1,45	5,22
	5,5	0,64	0,77	1,74	6,28
	7,0	0,50	0,81	2,69	9,70
	10,0	0,35	0,87	4,86	17,50
Песок средний (d=0,3 мм)	4,5	0,78	0,60	0,83	2,99
	5,0	0,70	0,62	1,19	4,27
	5,5	0,64	0,63	1,43	5,14
	7,0	0,50	0,66	2,19	7,90
	10,0	0,35	0,71	3,97	14,3

Число Куранта в расчетной области, определяющее физичность моделируемого процесса, не превышает единицы, что является хорошей оценкой [6], [7], [8].

Заключение

Результаты математического моделирования показали, что возникающая вблизи дна канала скорость течения в значительной степени зависит от скорости судна, в меньшей степени зависит от отношения осадки судна к общей глубине потока T/H и общей стесненности живого сечения канала. Значение возникающей скорости течения уменьшается с увеличением глубины под днищем судна. Наиболее опасным с точки зрения размыва дна канала является случай, когда дно сложено преимущественно мелкозернистым грунтом, судно имеет минимальный запас воды под днищем и

двигается с максимальной разрешенной скоростью. В таком случае скорость течения вблизи дна может достигать нескольких метров в секунду.

При отношении T/H=0,4, максимальная скорость течения, возникающая вблизи дна, при скорости судна до 10 км/ч, меньше значения допустимой неразмывающей. В данном случае влияние движения судна на придонную скорость крайне незначительно.

Описанный в статье подход позволяет дать оценку скорости судна, стесненности потока под днищем и стесненности живого сечения канала, при которых возможно активное переформирование дна канала в зависимости от рода грунта и других характеристик, влияющих на устойчивость подводных переходов магистральных трубопроводов, а также тиражировать методику расчетов для судов разных проектов при их прохождении по каналам и рекам.

Список литературы

1. Герасимов, С. С., & Ситнов, А. Н. (2024). Обзор и анализ способов оценки влияния условий эксплуатации подводных переходов магистральных трубопроводов на безопасность судоходства. Научные проблемы водного транспорта, (79), 209-218. https://doi.org/10.37890/jwt.vi79.495
2. Герасимов С.С., Ситнов А.Н. Обзор методов и разработка подходов к исследованию системы «судно-трубопровод» в условиях ненормативного состояния магистрального трубопровода//Транспорт. Горизонты развития. 2024: Материалы международного научно-практического форума. ФГБОУ ВО «ВГУВТ». – 2024. – URL: http://вф-река-море.рф/2024/6_4.pdf
3. Герасимов, С. С. (2025). Выбор модели турбулентности при математическом моделировании работы гребного винта. Научные проблемы водного транспорта, (83), 205-211. https://doi.org/10.37890/jwt.vi83.598
4. ВСН 163-83. Учет деформаций речных русел и берегов водоемов в зоне подводных переходов магистральных трубопроводов (нефтегазопроводов)» (утв. Миннефтегазстроем 09.06.1982; Мингазпромом 10.11.1983; Миннефтепромом 16.09.1983; Госкомнефтепродуктом РСФСР 12.08.1982; Госкомгидрометом 19.12.1983).
5. Гришанин К.В., Сорокин Ю.И. Гидрология и водные изыскания. Учебник для вузов/Под ред. К.В. Гришанин. – М.: Транспорт, 1982 – 212 с.
6. R. Courant, K. Friedrichs, H. Lewy. Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik // Mathematische Annalen. — 1928. — Т. 100, № 1. — С. 32—74.
7. Patankar S. Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics / Per. from English. – M.: Energoatomizdat, 1984. – 152 p.
8. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method (2nd Edition)', H. Versteeg, W. Malalasekera; Pearson Education Limited; 2007; ISBN 0131274988.

References

1. Gerasimov, S. S., & Sitnov, A. N. (2024). Review and analysis of methods for assessing the impact of operating conditions of underwater crossings of main pipelines on the safety of navigation. Scientific Problems of Water Transport, (79), 209-218. https://doi.org/10.37890/jwt.vi79.495
2. Gerasimov S.S., Sitnov A.N. Review of methods and development of approaches to the study of the «vessel-pipeline» system in the conditions of an abnormal state of the main pipeline.//Transport. Development Horizons. 2024: Materials of the international scientific and practical forum. FGBOU VO «VSUVT». - 2024. - URL: http://vf-reka-more.rf/2024/6_4.pdf
3. Gerasimov, S. S. (2025). Selection of a turbulence model in mathematical modeling of propeller operation. Scientific Problems of Water Transport, (83), 205-211. https://doi.org/10.37890/jwt.vi83.598

4. VSN 163-83. Accounting for deformations of river channels and banks of water bodies in the zone of underwater crossings of main pipelines (oil and gas pipelines)» (approved by the Ministry of Oil and Gas Construction on 09.06.1982; Ministry of Gas Industry on 10.11.1983; Ministry of Oil Industry on 16.09.1983; State Committee on Oil Products of the RSFSR on 12.08.1982; State Committee on Hydrometeorology on 19.12.1983).
5. Grishanin K.V., Sorokin Yu.I. Hydrology and water surveys. Textbook for universities/Edited by K.V. Grishanin. Moscow: Transport, 1982 – 212 p.
6. R. Courant, K. Friedrichs, H. Lewy. Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik // Mathematische Annalen. — 1928. — Т. 100, № 1. — С. 32—74.
7. Patankar S. Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics / Per. from English. – M.: Energoatomizdat, 1984. – 152 p.
8. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method (2nd Edition)', H. Versteeg, W. Malalasekera; Pearson Education Limited; 2007; ISBN 0131274988.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS

Герасимов Сергей Сергеевич, аспирант кафедры водных путей и гидротехнических сооружений, «Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: Gerasimov.s.sergeevich@mail.ru

Sergey S. Gerasimov, postgraduate student of the Department of Waterways and Hydraulic Structures, Volga State University of Water Transport 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Ситнов Александр Николаевич, профессор, д.т.н., зав. кафедрой водных путей и гидротехнических сооружений «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: stnv1952@rambler.ru

Aleksandr N. Sitnov, professor, doctor of technical sciences, head of the Department of waterways and hydraulic structures, Volga State University of Water, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 29.04.2026; принята к публикации 22.06.2026; опубликована онлайн 20.09.2026. Received 29.04.2026; published online 20.09.2026.

УДК 656.612.052:681.516.54:004.89
DOI: 10.37890/jwt.vi87.705

Принципы формирования процессных цифровых двойников судна

С.В. Ермаков
ORCID 0009-0009-7814-8877
Н.Ж. Малинин
ORCID 0009-0004-7439-0547
Д.В. Шевчук
ORCID 0009-0003-7861-5005
Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия

Аннотация. Настоящая работа посвящена решению проблемы формирования цифровых двойников процессов, протекающих на судне, находящимся в эксплуатации. При этом акцент сделан на таких эксплуатационных процессах как маневрирование и скоростное проседание судна. Показано, что существующие математические модели движения судна не обеспечивают абсолютно точного описания процесса маневрирования и имеют ограничения по применению, так же как имеют ограничения эмпирические формулы и алгоритмы для определения скоростного проседания. В качестве альтернативы для виртуального представления эксплуатационных процессов судна предлагается использовать цифровые двойники (Digital Twins – DT) этих процессов. В работе приведено обоснование принципов формирования таких цифровых двойников, при котором в первую очередь содержательно проанализировано понятие «процесс», включая непосредственно его дефиницию, классификации, принципы локализации, параметры и характеристики, частные состояния. Дано пояснение концептуальному различию между математической и цифровой моделями судна.

Приведены результаты содержательного анализа понятия «цифровой двойник», представлена визуализация концепции цифрового двойника морского судна в период его эксплуатации. Обоснована структура процессного эксплуатационного цифрового двойника судна. Непосредственно цифровой двойник есть суть совокупность векторного пространства векторов параметров и векторного пространства векторов характеристик. Представлены решения некоторых частных задач по формированию процессного эксплуатационного двойника, связанных с оптимизацией представления входных и выходных величин (параметров и характеристик). В заключение поставлены задачи для дальнейшего исследования, итоговая цель которого – создание полноценной методической базы для формирования и использования процессных эксплуатационных цифровых двойников судна.

Ключевые слова: эксплуатационные процессы судна, параметры и характеристики, цифровые двойники, принципы формирования.

Creating process-centric digital twins of a vessel principles

Sergey V. Ermakov
ORCID 0009-0009-7814-8877
Nikita Zh. Malinin
ORCID 0009-0004-7439-0547
Danila V. Shevchuk
ORCID 0009-0003-7861-5005
Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

Abstract. This paper addresses the problem of creating digital twins of processes occurring on a vessel in operation. Emphasis is placed on operational processes such as maneuvering and the squat. It is shown that existing mathematical models of vessel motion do not provide an absolutely accurate description of the maneuvering process and have limitations in their application, similar to the limitations of empirical formulas and algorithms for squat determining. As an alternative to virtual representation of vessel operational processes, it is proposed to use digital twins (DTs) of these processes. The paper substantiates the principles for creating digital twins of vessel operational processes. The article provides a rationale for the principles of forming such digital twins, which primarily includes a substantive analysis of the concept of "process", including its definition, classifications, localization principles, parameters and characteristics, and particular states.. The conceptual distinction between mathematical and digital models of a vessel is explained.
The article presents the results of a substantive analysis of the concept of «digital twin» and presents a visualization of the concept of a digital twin of a marine vessel during its operation. The structure of a process operational digital twin of a vessel is substantiated. A digital twin is essentially a set of a vector space of parameter vectors and a vector space of characteristic vectors. Solutions to some specific problems in creating a process operational twin are presented, related to the optimization of the representation of input and output quantities (parameters and characteristics). In conclusion, tasks for further research are set, the ultimate goal of which is the creation of a comprehensive methodological base for the formation and use of process operational twins of a vessel.

Keywords: vessel operational processes, parameters and characteristics, digital twins, principles of formation.

Введение

К настоящему времени разработано и используется немалое количество математических моделей, алгоритмов и формул для описания тех или иных процессов, связанных с эксплуатацией морского судна. В первую очередь, это математические модели движения судна, предназначенные для решения различных прикладных задач. В настоящее время существует целый ряд таких моделей, описанных в литературе. Так, в работе [1] рассмотрены восемь частично линеаризированных и нелинейных моделей, проанализированы достоинства, недостатки и ограничения этих моделей, а также проведена оценка их применимости в навигационных тренажёрах и в системах прогнозирования движения судов [1]. В качестве резюме этого исследования можно процитировать следующий вывод авторов: «…ни одна модель не является идеальной, ни одна не обеспечивает приемлемую точность сразу по всем … стандартным маневрам ни для одного судна» [1, с. 205].

Однако подход к прогнозированию протекания тех или иных процессов, связанных с эксплуатацией судна и обеспечением его навигационной безопасности, основанный на математическом описании этих процессов, далеко не ограничивается маневрированием. Так, при движении судна на мелководье, его корпус претерпевает скоростное проседание (squat), при котором увеличивается динамическая осадка судна и одновременно уменьшается запас глубины под килем (Under Keel Clearance – UKC). Очевидно, что игнорирование или неграмотный учёт UKC может привести (и нередко приводит) к касанию грунта или посадки на мель. Величина проседания зависит, в первую очередь, от скорости судна, и к настоящему времени предложено и используется значительное количество способов и формул для вычисления (предвычисления) скоростного проседания и UKC. Иными словами, процесс скоростного проседания судна на мелководье имеет практически значимое математическое описание. Вместе с тем, вопрос прогнозирования UKC и динамической осадки нельзя считать однозначно решённым. Во-первых, большинство формул являются исключительно эмпирическими. Во-вторых, методическая погрешность является неотъемлемым атрибутом большинства способов. В-третьих,

методология определения скоростного проседания не содержит способов, обладающих свойством универсальности как по типам судов, так и по условиям плавания – в любом случае имеют место быть ограничения [2, 3].

В настоящее время наряду с математическим моделирование получает признание и распространение моделирование цифровое, т.е. создание так называемых цифровых двойников объектов и процессов [4]. Следует предположить, что такой инструмент прогнозирования, как цифровой двойник, может быть использован для моделирования и прогнозирования различных процессов, связанных с обеспечением навигационной безопасности судна. Так, например, имея цифровую модель судна, информацию о его загрузке, прогнозируемых условиях плавания (включая характеристики акваторий плавания) и трафике на пути его следования, можно формировать рекомендации по оптимизации маршрута и режима движения. Кроме того, цифровой двойник может применяться для контроля состояния или управления физическим объектом при использовании технологий автономного судовождения [5].

Формирование любого цифрового двойника – сам по себе процесс во многих отношениях ресурсоёмкий. В свою очередь, его результативность во многом зависит не только от оптимальности соотношения требующихся и имеющихся ресурсов, но и от качества того фундамента, на котором он строится, т.е. от грамотно поставленных и сформулированных целей, задач и общих правил их достижения и решения. Таким образом, создание общих правил (принципов) формирования процессных двойников судна является актуальной задачей, а настоящая статья посвящена именно её решению.

Эксплуатационные процессы судна. Соотношение математического и цифрового моделирования

В общем случае под процессом необходимо понимать последовательную и необратимую смену состояний объекта (системы) во времени [6].

Количественно любая система описывается двумя классами величин, именуемыми параметрами и характеристиками. Параметры являются величинами, описывающими первичные свойства системы и условия её функционирования, и, одновременно, исходными данными задачи анализа системы. В свою очередь характеристики, являясь функцией параметров и результатом решения задачи анализа, описывают уже вторичные свойства системы. Исходя из этого, состояние системы определяется совокупностью значений её характеристик, зависящих от значений параметров и описывающих это состояние. Изменение хотя бы одной характеристики системы инициирует переход системы из одного состояния в другое, т.е. инициирует процесс (его начало или продолжение). Само изменение характеристики (характеристик) как причина перехода системы из одного состояния в другое называется событием [6]. Здесь следует заметить, что в различных иных источниках то, что здесь описано как характеристики и параметры, может иметь другие наименования.

Функционирование практически любой системы определяется совокупностью процессов, каждый из которых, по сути, является локальным. Однако конкретизация процесса как локального может быть двояким. Во-первых, под таковым следует понимать процесс, протекающий не во всей системе в целом, а в некоторой её части, т.е. в подсистеме. Во-вторых, локальный процесс может охватывать и всю систему целиком, но определяться изменением лишь части характеристик из всего его множества. В первом случае границы процесса определяются физически (посредством декомпозиции системы на составные части). Во втором случае первичны характеристики, и декомпозиции (разбиению на подмножества) подвергается уже множество характеристик. Очевидно, что эти два принципа

локализации процессов плотно взаимосвязаны, но однако они не тождественны друг другу.

Из приведённого, прикладного для настоящего исследования пояснения понятия «локальный процесс» следует представленное далее также прикладное обоснование понятия «частное состояние».

Судно является сложной технической системой, анализ состояния которой через множество всех характеристик не является рациональным. Более обоснованно рассматривать состояние не как что-то единое и единственное, а как множество его аспектов – частных состояний, каждый из которых описывается своим (ограниченным) пулом характеристик. Под частным состоянием системы (судна), таким образом, следует понимать совокупность характеристик, описывающих систему или часть системы (подсистему), образующих подмножество локальных характеристик множества всех характеристик системы (судна) и связанных с конкретной задачей по обеспечению эффективного функционирования системы (безопасной эксплуатации судна). В дальнейшем речь будет идти только о частных состояниях.

Здесь следует заметить следующее:

– подмножества локальных характеристик, описывающие различные частные состояния, так же как и различные локальные процессы могут пересекаться;

– некоторое исходное состояние (частное состояние) системы (подсистемы) в сочетании с внешними воздействиями, которые испытывает система (подсистема) в рассматриваемый промежуток времени, есть причина его последующих состояний (принцип причинности) [7];

– время (длительность и одновременность) – это универсальное свойство любого процесса;

– состояние системы (в том числе и частное состояние) можно иначе определить как точку в многомерном пространстве характеристик, которая одновременно является концом вектора характеристик, а движение этой точки (конца вектора) в указанном пространстве определяет траекторию состояний системы.

На рис. 1 графически представлено взаимоотношение представленных и описанных выше понятий (структура локального процесса).

Процессы могут быть управляемыми и неуправляемыми, линейными и разветвлёнными, конечными и (абстрактно) бесконечными и т.д. Необходимость использования конкретной классификации процессов, выделения того или иного типа процессов обуславливается содержанием (структурой) конкретного процесса и задачами, которые подлежат решению при его исследовании и использовании.

В частности, в целях настоящего исследования имеет значение классификация процессов на дискретные и непрерывные. У дискретных процессов состояния чётко ограничены друг от друга, а для каждого из них существуют смежные (соседние) состояния – предыдущее и (или) последующее. В свою очередь, непрерывные процессы характеризуются тем, что для любых двух состояний существует как минимум одно промежуточное состояние, т.е. понятие «смежные» состояния для непрерывных процессов не существует, а длительность события Δt стремится к нулю (на рис. 1 $\Delta t = t_k - t_n \to 0$).

Однако в целях настоящего исследования необходимо ввести в эту классификацию ещё один тип процессов – квазидискретные процессы. Под таковыми следует понимать непрерывные по сути процессы, прошедшие процедуру принудительной дискретизации.

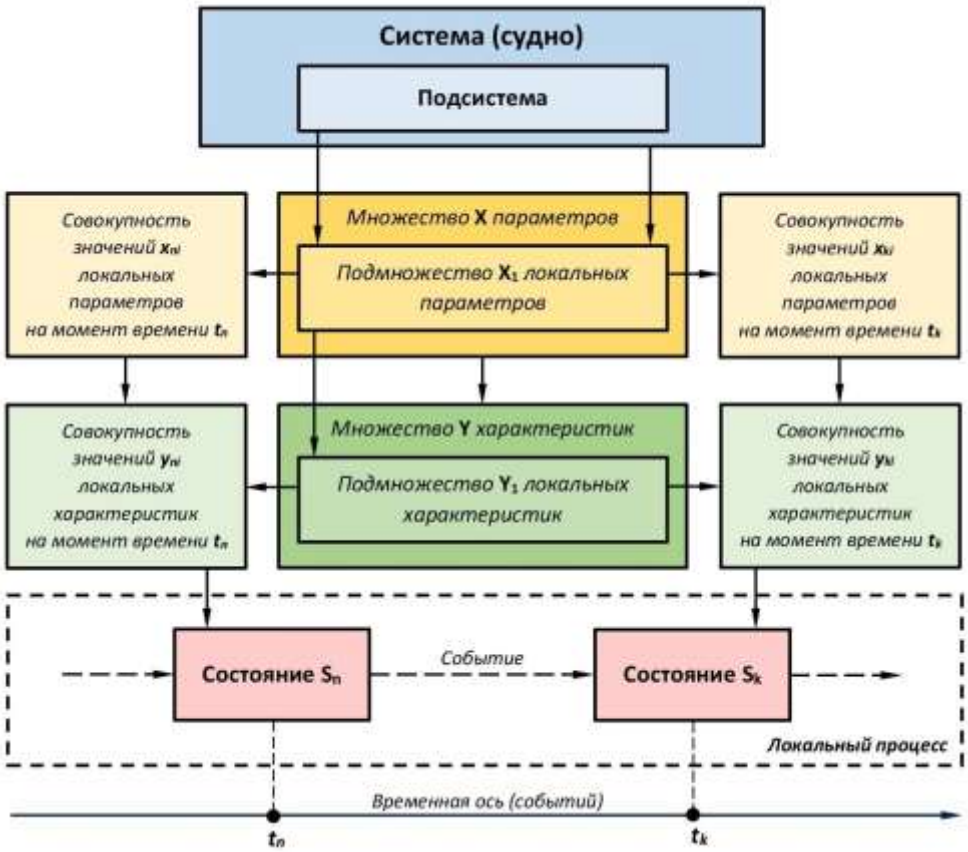


Рис. 1. Структура локального процесса

Например, процесс скоростного проседания судна, для которого параметрами являются скорость его движения, глубина под килем, статическая осадка и пр., а характеристиками – скоростное проседание и UKC, является непрерывным. Однако для предупреждения критических для безопасности судна значений характеристик вполне достаточно, например, ограничиться последовательностью состояний, события для которых будут определяться не любым изменением скорости судна и (или) глубины, а только изменением на некоторую ранее заданную величину ε. Значение этой величины, которую можно назвать чувствительностью параметра, будет определяться практически значимой точностью характеристики (её чувствительностью), которой должно обладать её значение для принятия решения по управлению процессом скоростного проседания (предупреждению касания грунта). Подобная дискретизация позволит избежать реакции той же системы поддержки принятия решений на неизбежную флуктуацию значений параметров и снизит нагрузку на вычислительные алгоритмы.

В случае маневрирования судна при его плоскопараллельном движении и, в частности, циркуляции, вектор характеристик будет включать в себя координаты и курсовой угол, а вектор параметров является результатом суперпозиции следующих векторов [1]:

1) вектор постоянных параметров, характеризующих конкретное моделируемое судно,

2) вектор управляющих воздействий, включающий в себя угол перекладки руля, частота вращения и шаговое отношение гребного винта, положение регулятора подруливающего устройства,
3) вектор нагрузки на судно, определяемый распределением груза,
4) вектор внешних возмущающих воздействий.

Здесь дискретизация имеет смысл для второго и четвёртого векторов из числа перечисленных. При этом, принимая во внимание, что параметры, составляющие вектор управляющих воздействий, изменяются, как правило, скачкообразно (т.е. процесс их изменения можно классифицировать как дискретный), то дискретизация здесь может потребоваться только при медленном непрерывным относительно длительным по времени изменением параметров.

Процесс скоростного проседания, процесс маневрирования в числе многих определим как эксплуатационные процессы, т.е. процессы, имеющие место во время эксплуатации судна. Тем самым рассматриваемые в настоящей статье процессы обосабливаются от тех, что являются неотъемлемой частью проектирования судна, его постройки, ремонта и т.д.

В общем виде, принимая во внимание изложенное, любой процесс можно описать следующим образом:

$$\vec{S}(t) = \vec{Y}(y_1, y_{2,}..., y_l) = F\left[\vec{X}(x_1, x_2, ..., x_m), t\right], \quad (1)$$

где $\vec{S}(t)$ – вектор состояния, $\vec{X}$ – вектор параметров, $\vec{Y}$ – вектор характеристик, F – оператор, устанавливающий правила (в частности, функцию) определения соответствия вектора характеристик вектору параметров в конкретный момент времени (позволяющие найти искомые характеристики по известным параметрам).

Математические модели эксплуатационных процессов судна (в частности, математические модели движения судна, его скоростного проседания на мелководье) основаны на аналитических выражениях, требующих проведения математических операций со значениями параметров для получения конечного результата (значений характеристик). Иными словами, функция зависимости характеристик от параметров представляется формулами (уравнениями и (или) их решениями).

В свою очередь, цифровая модель эксплуатационного процесса судна (в строгом восприятии являющаяся разновидностью математической модели) не предусматривает аналитической записи и представляет собой совокупность наборов значений параметров, где каждому набору «назначается» свой набор характеристик.

Концепция цифровых двойников. Цифровой двойник судна. Цифровой двойник эксплуатационного процесса

Как правило, в настоящее время чаще используется понятие «цифровой двойник», а не «цифровая модель». Это связано, в первую очередь, с развитием соответствующего направления исследований в англоязычных странах и введением там в обиход словосочетания Digital Twin.

Хотя терминология со течением временя менялась и пополнялась, основная концепция цифровых двойников оставалась довольно стабильной с момента ее создания в 2002 году. В общем случае, цифровой двойник – это набор виртуальных информационных конструкций, которые полностью описывают потенциальный или фактический физический произведенный продукт (объект, систему) от микроатомного уровня до макрогеометрического уровня и может существовать как самостоятельная сущность, одновременно будучи связанной с физическим объектом на протяжении всего жизненного цикла [4, 8]. Обобщённая простейшая визуализация цифрового двойника представлена на рис. 2 [4].



Рис. 2. Простейшая визуализация концепции цифрового двойника
(основные части цифрового двойника)

В работе [4] представлена уже концепция цифрового двойника морского судна в период эксплуатации. Схематически эта концепция изображена на рис. 3.

Структурно эта концепция включает в себя внутренние и внешние, значимые для цифрового двойника судна элементы из реального и виртуального пространства. Кроме самого судна реальное пространство содержит навигационное пространство, датчики S (сенсоры), другие суда V той же серии (того же проекта), суда T, которые осуществляют навигацию на той же акватории, что и наше судно, и могут считаться целями, как их понимают в задачах по расхождению судов [4].

Цифровой двойник судна включает в себя цифровые двойники компонентов DTC и процессов DTO. К первым (DTC) относятся виртуальные представления навигационного оборудования, судовой энергетической установки, механизмов, агрегатов и т.п. Множество DTO включается в себя цифровые двойники навигации, маневрирования (включая циркуляцию), швартовки, постановки на якорь, погрузки, выгрузки и т.д. В число цифровых двойников компонентов и процессов входит также ретроспективная информация, которая являлась основой цифрового двойника судна в периоды его проектирования, постройки и испытаний [4].

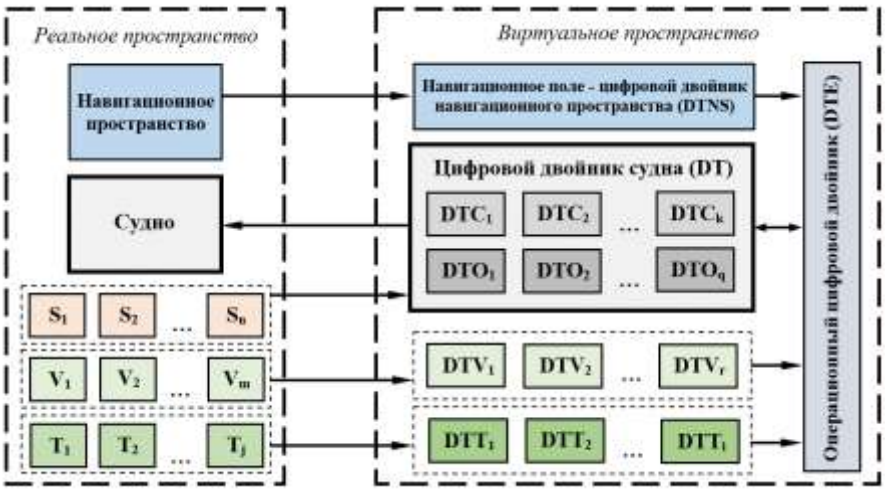


Рис. 3. Визуализация концепции цифрового двойника морского судна
в период его эксплуатации

Внешними по отношению к цифровому двойнику судна элементами виртуального пространства являются информационное навигационное поле (цифровой двойник навигационного пространства DTNS), цифровые двойники судов V и T (DTV и DTT), а также операционный цифровой двойник (DTE), представляющий собой некоторую среду цифровых двойников, которая предназначена для выполнения различных (в первую очередь, вычислительных) операций [4].

Далее выделим из схемы, представленной на рис. 3, цифровой двойник процесса (процессный эксплуатационный цифровой двойник судна) и обоснуем его структуру и содержание (рис. 4).



Рис. 4. Процессный эксплуатационный цифровой двойник судна

В отличие от того, как это сделано в структуре цифрового двойника, представленного на рис. 3, операционный цифровой двойник (DTE) не вынесен отдельным блоком, а является некоторой средой для процессного цифрового двойника (DTO). Входные для процессного двойника параметры первоначально «проходят» DTE, содержащего, как было отчасти замечено выше, существующие математические модели процессов, ретроспективные данные, полученные при наблюдении за процессом или его моделировании на стадии, предшествующей вводу в эксплуатацию, процессные цифровые двойники судов-прототипов. Кроме того, операционный цифровой двойник включает в себя различные инструменты обработки данных, суть которых будет пояснена ниже. Таким образом, в отношении операционного цифрового двойника имеет место некоторая его дефрагментация, результатом которой является выделение информационных и инструментального фрагментов.

Непосредственно цифровой двойник есть суть совокупность двух векторных (линейных) пространств X и Y, где пространство X представляет собой полную совокупность векторов параметров $\vec{X}_i\left(x_{1i}, x_{2i}, ..., x_{mi}\right)$, а пространство Y – также полную совокупность векторов характеристик $\vec{Y}_j\left(y_{1j}, y_{2j,}..., y_{lj}\right)$. При этом имеет место быть сюръективное отображение векторного пространства X на векторное пространство Y $\left(f{:}X \to Y\right)$, т.е. такое соответствие между двумя векторными пространствами, при котором каждому вектору пространства X поставлен в соответствие как минимум один вектор пространства Y (каждый вектор пространства Y является образом хотя бы одного вектора пространства X) [9, 10].

Кроме сюръективного отображения (сюръекции) существуют ещё такие отношения множеств (пространств), как биекция и инъекция (рис. 5). Биективное (взаимно однозначное) отображение (соответствие) предполагает, что каждому элементу векторного пространства X соответствует ровно один вектор пространства

Y, при этом определено обратное отображение, которое обладает тем же свойством. В свою очередь, при инъективном (одно-однозначном) отображении разные вектора пространства *X* переводятся в разные вектора пространства *Y*. При этих определениях инъективное отображение является одновременно биективным, а сюръективное – и биективным, и инъективным [9, 10].

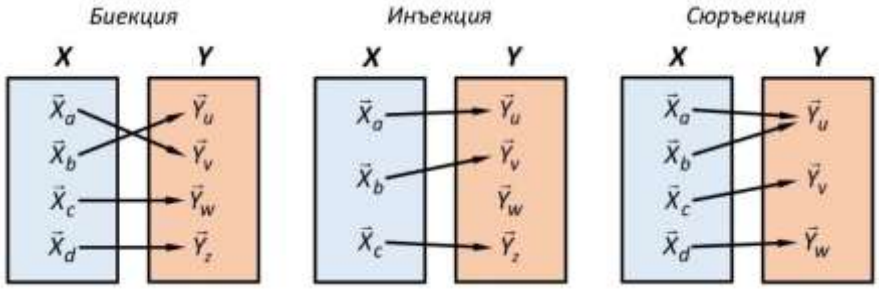


Рис. 5. Виды отображения векторных пространств

Сюръективность отображения объясняется здесь тем, что одну, требуемую совокупность характеристик процесса можно получить различным набором входных для процесса параметров. Так, элементы циркуляции, как и в принципе траекторию движения судна на циркуляции можно получить более, чем одним сочетанием значений скорости судна, угла перекладки руля и прочих определяющих циркуляцию параметров. Также одни и те же величины скоростного проседания и UKC могут определяться различными комбинациями значений скорости, поперечного сечения канала, глубины и т.д. Здесь следует допустить, что при более глубоком и обширном анализе эксплуатационных процессов могут быть обнаружены эксплуатационные процессы, для которых цифровой двойник будет представлять биекцию или инъекцию векторных пространств. Однако, на настоящем этапе исследования подобное считается больше исключением, чем правилом, особенно для эксплуатационных процессов, имеющих отношение к навигации судна.

В случае исключительно формального подхода к анализу процессного цифрового двойника можно сделать вывод о том, что пространства *X* и *Y* являются бесконечными. Действительно, практически любой набор значений параметров (любой вектор пространства *X*) в случае измерения параметров с абсолютной точностью (или нулевой погрешностью, что в принципе невозможно) и (или) при использовании в числовом значении бесконечно большого количества значащих цифр будет уникальным. При этом для любого значения параметра будут существовать большие и меньшие значения. Таким образом, как количество возможных значений самих параметров, так и число их комбинаций (число векторов) будет бесконечным. Следовательно, пространство *X* будет бесконечным, так же как и будет бесконечным пространство *Y* векторов характеристик.

Однако результат любого измерения любого параметра будет содержать некоторую погрешность Δ_1. Кроме того, некоторые параметры (не измеряемые, а устанавливаемые оператором) могут быть заданы только с определённой точностью. Так, например, угол перекладки руля, как правило, задаётся с точностью до целых, т.е. дискретность задания этого параметра равна 1°. При этом истинное значение угла перекладки руля будет неизвестным, в общем случает отличным от заданного и находится в некотором интервале. Подобный вывод можно сделать по отношению к любому заданному или измеренному параметру, истинное значение которого с некоторой вероятностью находится в доверительном интервале $\left(x_{изм} - \Delta x_1; x_{изм} + \Delta x_1\right)$, где Δx_1 определяется как указанной вероятностью, так и

величиной погрешности измерения (задания). Таким же образом (посредством интервальной оценки) формируется понятие об истинных значениях характеристик.

Вместе с тем, для значений характеристик процесса достаточно не фактической, а практически значимой точности, т.е. той точности, которая обеспечит выполнение поставленной задачи. Таким образом, изначально можно сформировать дискретное и конечное множество $y_{i1}, y_{i2}, .., y_{ij}, ..., y_{il}$ возможных значений той или иной (i-й) характеристики. Тогда в случае формирования процессного цифрового двойника любое измеренное значение характеристики будет при его записи в DTO меняться на y_{ij}, если это измеренное значение попадает в интервал $\left(y_{ij} - \left(y_{ij} - y_{i(j-1)}\right)/2; y_{ij} + \left(y_{i(j+1)} - y_{ij}\right)/2\right) = \left(y_{ij} - \Delta_{yj.л}; y_{ij} + \Delta_{yj.пр}\right)$. Указанный интервал не является доверительным в том смысле, которой вкладывается в него математической статистикой. В общем случае отстояния граничных значений интервала справа и слева от значения характеристики y_{ij}, содержащейся во множестве возможных значений, могут отличаться, т.е. $\Delta_{yj.л} \neq \Delta_{yj.пр}$, т.к. дискретность $d_{yij} = y_{ij} - y_{i(j-1)}$ ряда возможных значений характеристики не обязательно должна быть постоянной. Сами же значения $\Delta_{yj.л}$ и $\Delta_{yj.пр}$ зависят в первую очередь от необходимой (практически значимой) точности измерений этих характеристик в контексте задачи, для решения которой формируется цифровой двойник. Разработка же методики определения величин $\Delta_{yj.л}$ и $\Delta_{yj.пр}$ является задачей будущего периода настоящего исследования. Однако, одно условие существования и использования представленных интервалов и упомянутой методики очевидно: фактическая точность не должность быть хуже необходимой.

Аналогичные умозаключения можно сделать и по отношению к входным параметрам процесса, возможные значения каждого из которых представляются множествами $x_{i1}, x_{i2}, .., x_{ij}, ..., x_{im}$ с тем дополнением, что величины $\Delta_{xj.л}$ и $\Delta_{xj.пр}$ будут определяться также значениями $\Delta_{yj.л}$ и $\Delta_{yj.пр}$.

Такое представление множеств возможных значений параметров и характеристик делает векторные пространства X и Y конечными, а процедуру формирования процессного цифрового двойника и его дальнейшее использование более рациональными. Рациональность в этом случае заключается в компромиссе между простотой, точностью и полнотой цифрового двойника, а количество возможных векторов параметров и характеристик будет определять произведением количественных объёмов множеств. Так, допустим, что некоторый процесс определяется тремя входными параметрами (или характеристиками), при этом для первого из них существует 11 возможных значений, для второго – 6, а для третьего – 8. Тогда векторное пространство X (или Y) будет содержать $11 \cdot 6 \cdot 8 = 528$ векторов. Однако, следует заметить, что некоторые векторы будут содержать в себе координаты (значения параметров), сосуществование которых может быть физически неразумным при том, что по отдельности числовые значения параметров (характеристик) существовать могут. Например, волнение в 8 баллов и штиль (т.е. ветер 0 баллов) являются физически разумными, но только тогда, когда они не наблюдаются на одной акватории в один момент времени (т.е. не являются координатами одного вектора параметров). Таким образом, определяемое через упомянутое выше произведение количество векторов пространства X является не точным, а оценочным (максимально возможным). Такие «физически неразумные» вектора поименуем для определённости «безадресными». Для безадресных векторов пространства X не существует образа в пространстве Y. И, наоборот, безадресные вектора пространства Y не имеют прообраза

в пространстве *X*. Тем самым нарушается сюръективное отображение, но только в том случае, если процедура формирования векторов обоих пространств с использованием множеств возможных значений и характеристик останется механистическим и формальным и не будет разработана и реализована методика исключения безадресных векторов из пространств.

Очевидно, что при формировании цифрового двойника путём измерения и записи параметров и характеристик, безадресные векторы, являясь, как было сказано выше, «физически неразумными», возникнуть не могут. Однако их источником может стать операционный цифровой двойник, который не только «укладывает» измеренные значения параметров и характеристик в интервалы, но и выполняет более сложную задачу – устраняет информационные пробелы, т.е. «додумывает» те вектора и их координаты, которые не были получены в результате измерений. В результате и в случае некорректного выполнения указанной задачи векторные множества будут включать все возможные с точки зрения комбинаторики, а не практики, вектора, в т.ч. и безадресные.

Задача устранения информационных пробелов может быть решена посредством использования содержащихся в операционном цифровом двойнике данных об аналогичных процессах, полученных на судах-прототипах, математических моделей и различных математических инструментов, в частности, нейросетей.

Так, например, операционный цифровой двойник, используя соответствующие критерии и методики, подбирает несколько (в частном случае, одну) математических моделей процесса, ранжирует их по степени применимости и точности, уточняет при необходимости и на основе уже имеющихся векторов параметров и их образов эмпирические коэффициенты и вычисляет недостающие значения векторов характеристик. Эти значения могут быть представлены непосредственно в процессный цифровой двойник либо в нейросеть для дальнейшей их совместной обработки со значениями, полученными из других источников – информационных фрагментов операционного цифрового двойника. Вместе с тем, построение нейросети, включая выбор архитектуры и обучение модели, представляют собой отдельную масштабную процедуру, содержание и успех выполнение которой зависит в первую очередь от поставленной перед процессным цифровым двойником задачи (или задач). В любом случае, для восполнения пробелов векторных пространств нейросеть должна научиться «затягивать» их при помощи математических моделей, информации, уже содержащейся в процессном цифровом двойнике, а также представленной в аналогичных судовых двойниках судов-прототипов и ретроспективной информации, определяя предварительно для этих видов информации (значений параметров и характеристик) адекватные весовые оценки (веса).

Лингвистическая формализация принципов

Приведенные выше рассуждения и выводы либо являются непосредственно правилами формирования процессного цифрового двойника, либо имеют отношение к обоснованию этих правил, в совокупности представляя собой принципы формирования DTO. Вместе с тем, кодекс принципов нельзя считать полным без представленного ниже описания их посредственном естественного языка, т.е. без лингвистической формализации принципов.

Первым в числе принципов укажем тривиальный *принцип адекватности*, согласно которому процессный цифровой двойник по известным параметрам процесса должен «производить» все его значимые характеристики, т.е. характеристики, определяющие процесс «как есть».

С принципом адекватности тесно связан *принцип необходимой точности*, согласно которому, цифровой двойник должен не просто выдавать на выходе все

значимые характеристики, но и делать это с такой точностью, которая необходима для решения задач или задачи, определяющих назначение цифрового двойника.

Принцип индивидуальности заключается в том, что цифровой двойник судна должен отражать сущность и соответствующие процессы конкретного судна, а не любого судна аналогичного проекта или схожего по характеристикам. Вместе с тем, он должен быть по сути агрегированным, т.е. включать в себя цифровые двойники судна той же серии, которые будут нести вспомогательные функции, помогая вместе с математическими моделями и другими средствами и методами закрывать цифровому двойнику судна информационное пробелы. В этом заключается *принцип агрегированности* цифрового двойника.

Режим онлайн должен быть единственным режимом цифрового двойника процесса в том смысле, что он должен быть всегда доступен, без задержек обновлён и без какого-либо ожидания выдавать всю необходимую информацию. Этот режим определяет *принцип быстродействия* цифрового двойника.

Следующий принцип – *принцип конечности (ограниченности в объёме)* цифрового двойника, подразумевающий включение в DTO такого объёма информации, который делает процедуры его формирования и дальнейшего использования исполнимыми и эффективными. Иными словами, начальная стадия формирования процессного цифрового двойника, по окончанию которой он уже может использован по назначению, должна длиться физически разумное время, а информация занимать физически разумный объём памяти. В свою очередь, при использовании цифрового двойника по назначению объём информации не должен «тормозить» выработку характеристик процесса и инициировать сдвиг по времени между входом (параметрами) и выходом (характеристиками). Таким образом, принцип конечности обеспечивает также и принцип быстродействия.

Рядом с принципом конечности сосуществует *принцип оценивания полноты и её достаточности*. Если первым ограничивается максимум объёма информации, то вторым, по сути, её минимум. Иными словами, цифровой двойник для обеспечения своей полной функциональности должен включать в себя некоторый минимум информации, при этом такой минимум должен быть оценён непосредственно перед началом формирования по методике, которая ещё подлежит обоснованию.

Как было показано выше, даже непрерывные параметры должны питать цифровой двойник дискретными значениями. В этом заключается *принцип дискретности и квазидискретности*.

Принцип эволютивности цифрового двойника определяет необходимость присутствия у него способности к бесконечному развитию и модификациям.

Показанная выше сюръективность отображения векторного пространства параметров на векторное пространство характеристик указывает на самостоятельный и важный принцип, который именуется следующим образом – *принцип сюръективности*.

При формировании любого процессного эксплуатационного цифрового двойника природа детерминированности набора характеристик своим набором параметров никакого значения не имеет. Как запись в цифровой двойник пары векторов (параметров и характеристик), так и извлечение характеристик по текущим входным параметрам при использовании цифрового двойника должен иметь чисто механистический характер. Тем самым обоснуемый перечень принципом можно полонить ещё одним – *принципом игнорирования причинности*.

Операционный цифровой двойник среди прочего включает в себя математические модели, ретроспективную информацию, цифровые двойники других судов того же типа т.п., которые «включаются» в работу в первую очередь при возникновении необходимости восполнить информационные пробелы в процессном цифровом двойнике. В таком случае, как и в случае совместного использования данных, полученных косвенным (через математические модели и пр.) и прямым (посредством

измерений) путём, процессный цифровой двойник должен определять ценность данных от каждого источника, т.е. должен «взвешивать» их, оценивая степень применимости. Таким образом, процедура формирования цифрового двойника должна соответствовать *принципу взвешенного использования данных*.

В итоге, при формировании процессного эксплуатационного цифрового двойника судна необходимо принимать во внимание следующие принципы:

– принцип адекватности;
– принцип необходимой точности;
– принцип индивидуальности;
– принцип агрегированности;
– принцип конечности (ограниченности в объёме);
– принцип оценивания полноты и её достаточности;
– принцип дискретности и квазидискретности;
– принцип эволютивности;
– принцип сюръективности;
– принцип игнорирования причинности;
– принцип взвешенного использования данных.

Представленный перечень не является исчерпывающим, однако он содержит основные правила формирования цифрового двойника, следование которым должно максимально способствовать получению эффективного инструментария для прогнозирования развития любого процесса, связанного с эксплуатацией морского судна.

Заключение

Технология цифровых двойников (Digital Twins Technology), несмотря на большое количество проблем, препятствующих её массовому внедрению в настоящий момент, видится одним из самых перспективных направлений развития морского флота. Более того, существующие тенденции в сфере автономного судоходства делают эту технологию ещё более востребованной. В условиях стремительного развития концепции морских автономных надводных судов возникает насущный вопрос о создании интеллектуальных систем, которые не просто повторяют действия человека, но и способны предсказывать развитие ситуации, анализируя огромные объемы данных в реальном времени. Цифровой двойник, представляющий собой виртуальную копию физического объекта, который постоянно обменивается данными с ним, является идеальным инструментом для решения этой задачи. В сфере судоходства он позволяет перейти от реактивного управления, когда решения принимаются после изменения обстановки, к проактивному, когда система заранее просчитывает несколько сценариев и предлагает оптимальный вариант.

В отличие от сухопутных физических объектов морское судно для реализации цифровых двойников является объектом более сложным, а, точнее, более проблематичным. В первую очередь, это связано с необходимостью наличия на борту средств хранения информации, объём которой в случае DT позволяет отнести их к большим данным (big data). В свою очередь, вариант облачного хранения предусматривает наличие надёжного непрерывного высокоскоростного Интернет-соединения. Меньшая проблема имеет место быть с источниками данных цифрового двойника. В этих целях может использоваться навигационное и иное оборудование современных морских судов, являющееся для них штатным (обязательным). Ещё одна проблема – методологическое обеспечение формирования цифрового двойника – отчасти решена в настоящей статье, посвящённой DTO – цифровым двойникам процессов, для которых приведены описание (в том числе графическое) и

сформулированы (обоснованы) ряд правил представления параметров, «питающих» DTO, и характеристик, являющихся результатом его работы.

Все изложенные в настоящей работе положения имеют отношение к любому процессному судовому двойнику судна (т.е. к любому эксплуатационному процессу). Однако, изначально акцент был сделан на маневрировании и скоростном проседании. В рамках же продолжения исследования видится в первую очередь необходимой разработка методики оценки полноты и достаточности цифрового двойника, обоснование его содержания (перечень параметров и характеристик), подбор надлежащих математических моделей, формул и алгоритмов, разработка методики по их актуализации (уточнению) посредством использования записанных в DT пар «вектор параметров – вектор характеристик». Одновременно следует ожидать технических и программных решений, касающихся методов и средств хранения большого объёма данных.

Список литературы

1. Юдин Ю.И., Сотников И.И. Математические модели плоскопараллельного движения судна. Классификация и критический анализ // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2006. Т. 9, № 2. С. 200-208.
2. Ермаков С.В., Шевчук Д.В. Концепция адаптивной системы оценки текущего и прогностических значений скоростного проседания судна // Балтийский морской форум: Материалы XI Международного Балтийского морского форума. В 8-ми томах, Калининград, 25-30 сентября 2023 года. Калининград: Калининградский государственный технический университет, 2023. С. 25-28.
3. Шевчук Д.В., Ермаков С.В. Целеполагание для развития адаптивной системы оценки текущего и прогностического значений скоростного проседания судна // Вопросы безопасности. 2025. № 4. С. 1-14. DOI: 10.25136/2409-7543.2025.4.75846.
4. Ермаков С.В., Мулина Е.В., Малинин Н.Ж. Цифровой двойник судна в период эксплуатации и оценка возможности его использования в целях построения и реализации траектории морских автономных надводных судов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2025. № 2. С. 48-58. DOI: 10.24143/2073-1574-2025-2-48-58.
5. РС: Цифровые двойники судов могут применяться для проверки и подтверждения принятых технических решений. URL: https://portnews.ru/news/364426/ (дата обращения 08.11.2025).
6. Алиев Т.И. Основы моделирования дискретных систем. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. 363 с.
7. Новая философская энциклопедия: В 4 т. / Ин-т философии Рос. акад. наук, Нац. обществ.-науч. фонд; Науч.-ред. совет.: В. С. Степин [и др.]. М.: Мысль, 2010. Т. 3. 2010. 692 с.
8. Grieves, M., Vickers, J. (2017). Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: Kahlen, J., Flumerfelt, S., Alves, A. (eds) Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Springer, Cham. DOI:10.1007/978-3-319-38756-7_4.
9. Ершов Ю.Л., Палютин Е.А. Математическая логика. СПб.: Лань, 2004. 336 с.
10. Верещагин Н.К., Шень А. Лекции по математической логике и теории алгоритмов. Часть 1. Начала теории множеств. М.: МЦНМО, 2002. 128 с.

References

1. Yudin Yu.I., Sotnikov I.I. Matematicheskie modeli ploskoparallel`nogo dvizheniya sudna. Klassifikaciya i kriticheskij analiz [Mathematical models of plane-parallel vessel motion. Classification and critical analysis] // Vestnik MGTU. Trudy` Murmanskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. 2006. T. 9, № 2. (In Russ). Pp. 200-208.
2. Ermakov S.V., Shevchuk D.V. Koncepciya adaptivnoj sistemy` ocenki tekushhego i prognosticheskih znachenij skorostnogo prosedaniya sudna [Concept of an adaptive system for assessing current and prognostic values of squat] // Baltijskij morskoj forum: Materialy` XI Mezhdunarodnogo Baltijskogo morskogo foruma. V 8-mi tomah, Kaliningrad, 25-30 sentyabrya 2023 goda. Kaliningrad: Kaliningradskij gosudarstvenny`j tehnicheskij universitet, 2023. (In Russ). Pp. 25-28.

3. Shevchuk D.V., Ermakov S.V. Celepolaganie dlya razvitiya adaptivnoj sistemy` ocenki tekushhego i prognosticheskogo znachenij skorostnogo prosedaniya sudna [Goal setting for the development of an adaptive system for assessing the current and predicted values of the vessel's squat] // Voprosy` bezopasnosti. 2025. № 4. (In Russ). Pp. 1-14. DOI: 10.25136/2409-7543.2025.4.75846.
4. Ermakov S.V., Mulina E.V., Malinin N.Zh. Cifrovoj dvojnik sudna v period e`kspluatacii i ocenka vozmozhnosti ego ispol`zovaniya v celyah postroeniya i realizacii traektorii morskih avtonomny`h nadvodny`h sudov [Digital twin of a vessel during operation and assessment of its possible use for the purpose of constructing and implementing of maritime autonomous surface ships trajectory] // Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tehnika i tehnologiya. 2025. № 2. (In Russ). Pp. 48-58. DOI: 10.24143/2073-1574-2025-2-48-58.
5. RS: Cifrovy`e dvojniki sudov mogut primenyat`sya dlya proverki i podtverzhdeniya prinyaty`h tehnicheskih reshenij. URL: https://portnews.ru/news/364426/ (08.11.2025).
6. Aliev T.I. Osnovy` modelirovaniya diskretny`h system [Fundamentals of discrete systems modeling]. (In Russ). SPb: SPbGU ITMO, 2009. 363 p.
7. Novaya filosofskaya e`nciklopediya [New Philosophical Encyclopedia]: V 4 t. / In-t filosofii Ros. akad. nauk, Nacz. obshhestv.-nauch. fond; Nauch.-red. sovet.: V.S. Stepin [i dr.]. M.: My`sl`, 2010. T. 3. 2010. (In Russ). 692 p.
8. Grieves, M., Vickers, J. (2017). Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: Kahlen, J., Flumerfelt, S., Alves, A. (eds) Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Springer, Cham. DOI:10.1007/978-3-319-38756-7_4.
9. Ershov Yu.L., Palyutin E.A. Matematicheskaya logika [Mathematical logic]. SPb.: Lan`, 2004. 336 p.
10. Vereshhagin N.K., Shen` A. Lekcii po matematicheskoj logike i teorii algoritmov. Chast` 1. Nachala teorii mnozhestv [Lectures on mathematical logic and theory of algorithms. Part 1. Elements of set theory]. M.: MCzNMO, 2002. 128 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ермаков Сергей Владимирович, к.т.н., доцент кафедры судовождения и безопасности мореплавания, Калининградский государственный технический университет (ФГБОУ ВО «КГТУ»), 236029, г. Калининград, ул. Молодёжная, 6, e-mail: sv.ermakov@bgarf.ru

Sergey V. Ermakov, Ph.D. in Engineering Science,Associate Professor of Department of Navigation and Maritime Safety, Kaliningrad State Technical University, 6, Molodeznaya str., Kaliningrad, 236029

Малинин Никита Жанович, преподаватель кафедры судовождения и безопасности мореплавания, Калининградский государственный технический университет (ФГБОУ ВО «КГТУ»), 236029, г. Калининград, ул. Молодёжная, 6, e-mail: for_informatics@mail.ru

Nikita Zh. Malinin, Lecturer of Department of Navigation and Maritime Safety, Kaliningrad State Technical University, 6, Molodeznaya str., Kaliningrad, 236029

Шевчук Данила Влаимирович, аспирант кафедры судовождения и безопасности мореплавания, Калининградский государственный технический университет (ФГБОУ ВО «КГТУ»), 236029, г. Калининград, ул. Молодёжная, 6, e-mail: schevchuk.dan@yandex.ru

Danila V. Shevchuk, postgraduate student of Department of Navigation and Maritime Safety, Kaliningrad State Technical University, 6, Molodeznaya str., Kaliningrad, 236029

Статья поступила в редакцию 04.02.2026; принята к публикации 10.04.2026; опубликована онлайн 20.09.2026. Received 04.02.2026; published online 20.09.2026.

УДК 629.5.015.14

DOI: 10.37890/jwt.vi88.727

Практический анализ риска возникновения «чистой» потери остойчивости при заливании палубы на примере судна «OLYMPIC INTERVENTION IV»

М.В. Осокин
ORCID: 0009-0003-7596-6993
М.В. Жуков
Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Обязательные минимальные критерии остойчивости судна, предписанные Международным кодексом по остойчивости судов в неповреждённом состоянии, базируются на статистике аварий и не учитывают размеры и особенности обводов корпусов конкретных судов при расчёте их поведения в условиях волнения. С момента принятия кодекса в 2008 году учёными разных стран выполнен большой объём исследований по оценке динамической остойчивости судов различных типов в условиях волнения. Современное математическое моделирование позволяет достаточно точно прогнозировать поля ветрового волнения и зыби в различных районах Мирового океана. Поэтому Комитетом по безопасности мореплавания ИМО принято Предварительное руководство ко второму поколению критериев остойчивости неповреждённого судна в условиях волнения, изложенное в циркулярах №1627 и №1652. В них сказано о том, что для определённых судов методы расчёта некоторых критериев, могут давать недостоверные результаты. В частности, это актуально для низкобортных судов, подверженных заливанию открытой палубы при расчёте так называемой «чистой» потери остойчивости. Данная статья посвящена попытке уточнения методов расчёта уязвимости остойчивости низкобортных судов по указанному критерию.

Ключевые слова: второе поколение критериев остойчивости неповреждённого судна, чистая потеря остойчивости, момент инерции действующей ватерлинии, заливание палубы судна.

A practical analysis of the risk of pure loss of stability during deck flooding using the example of the vessel «OLYMPIC INTERVENTION IV»

Mikhail V. Osokin
ORCID: 0009-0003-7596-6993
Maxim V. Zhukov
Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The mandatory minimum ship stability criteria prescribed by the International Intact Stability Code are based on accident statistics and do not take into account the dimensions and hull contours of specific ships when calculating their performance in rough seas. Since the Code's adoption in 2008, scientists from various countries have conducted extensive research assessing the dynamic stability of various types of ships in rough seas. Modern mathematical modeling allows for the accurate prediction of wind-induced wave and swell fields in various regions of the world's oceans. Therefore, the IMO Maritime Safety Committee adopted Interim Guidelines on the Second Generation Intact Stability, as set out in Circulars No. 1627 and No. 1652. These guidelines state that for some vessels, the calculation methods for some criteria may yield unreliable results. This is particularly true

for low-sided vessels susceptible to open deck flooding when calculating the so-called pure loss of stability. This article attempts to refine the methods for calculating the stability vulnerability of low-sided vessels using this criterion.

Keywords: second generation of intact stability criteria, pure loss of stability, moment of inertia of the current waterline, flooding of the ship's deck.

Введение

Обеспечение безопасности мореплавания, в частности – соблюдение норм остойчивости судна, является фундаментальной задачей при проектировании и эксплуатации морских судов. Обязательные критерии остойчивости, изложенные в части А ныне действующего Кодекса [1] основаны на статистике аварий и предполагают некую универсальность, то есть должны подходить для всех судов наиболее распространённых типов, независимо от обводов корпуса. Современные нормы динамической остойчивости на волне, разрабатываемые Международной морской организацией (IMO), изложенные в [2] и уточняемые в [3], основаны на проводимых в последние годы научных исследованиях в области влияния морского волнения на остойчивость судна, подобных [4]. Среди пяти основных режимов уязвимости остойчивости, учитываемых в критериях второго поколения (Second Generation Intact Stability Criteria), особое место занимает так называемая «чистая» потеря остойчивости (Pure Loss of Stability). Данное явление становится особенно сложным для прогнозирования, когда движение судна в условиях волнения сопровождается заливанием открытых участков палубы, что, характерно для судов, предназначенных для обслуживания буровых платформ с надстройкой в носовой части корпуса, низким надводным бортом и большой протяжённостью палубы-площадки, расположенной за надстройкой в сторону кормы, таких как рассматриваемое в качестве примера в данной статье судно «OLYMPIC INTERVENTION IV», построенное по проекту ULSTEIN P101. В циркуляре Комитета по безопасности мореплавания ИМО [2] упомянуты ограничения, присущие приводимым в нём методам оценки остойчивости с точки зрения различных видов уязвимостей. В том числе, в нём сказано, что критерий уязвимости остойчивости для режима «чистой» потери остойчивости дает недостоверные результаты для судов с низким надводным бортом, а в [3] уточняется, что речь идёт как раз о судах, подобных рассматриваемому в данной статье.

Физический смысл «чистой» потери остойчивости

Так называемая «чистая» потеря остойчивости — динамическое явление, которое возникает, когда у судна, имеющего развал бортов в оконечностях корпуса, эти оконечности попадают на впадины достаточно длинных волн. Явление особенно выражено, когда длина последних близка к длине судна. Гребни волн при этом оказываются на цилиндрической вставке, где борта вертикальны и ординаты действующей ватерлинии не зависят от уровня воды у борта. С одной стороны, в этом положении распределение сил плавучести по длине корпуса меняется по сравнению со спокойной водой. Если волна имеет длину, близкую по значению к длине судна, а её вершина находится в районе миделя, нос и корма оказываются вблизи подошв соседних волн, что приводит к значительному уменьшению сил плавучести в оконечностях с одновременным их увеличением в средней части корпуса. Такое перераспределение сил плавучести оказывает влияние на общую прочность корпуса. С другой стороны, если не учитывать вертикальную качку и влияние на корпус сил инерции, при расчёте остойчивости величина и аппликата точки приложения равнодействующей сил плавучести на волне не сильно меняются по сравнению с

таковыми на спокойной воде, так как рост аппликат точек приложения сил плавучести в районе миделя (на гребне волны) компенсируется их уменьшением в оконечностях (на впадинах волн). Однако, при этом у судна, имеющего развал бортов в оконечностях корпуса, из-за понижения уровня воды у борта в этих местах уменьшаются ординаты действующей ватерлинии. Как известно, значение метацентрического радиуса (влияющего на значение аппликаты поперечного метацентра) прямо пропорционально моменту инерции действующей ватерлинии относительно её продольной оси, зависящему от интеграла кубов ординат ватерлинии по её длине. В циркуляре [2] для оценки уязвимости по «чистой» потере остойчивости судна, обладающего достаточно высоким надводным бортом на первом уровне (под этим термином подразумевается наихудший теоретический случай, когда волнение условно принимается регулярным) предлагается рассчитывать изменение метацентрической высоты через изменение метацентрического радиуса с помощью момента инерции действующей ватерлинии при осадке, равной:

$$d_L = d - \delta d_L, \quad (1)$$

где $\delta d_L = d - 0.25 d_{full}$ или $\delta d_L = {}^{0.034L}/_{2}$, что меньше.

Здесь d – средняя осадка судна при данной загрузке на спокойной воде.

d_{full} - осадка судна при полной загрузке на спокойной воде.

При этом $d - 0.25 d_{full}$ не может быть меньше нуля.

L – величина, принимаемая равной 96% длины судна по ватерлинии, проходящей на высоте, равной 85% расчётной высоты борта, измеренной от верхней кромки киля, или длине от передней кромки форштевня до оси баллера руля по той же ватерлинии, если эта длина больше.

Как видим, в этом случае высота волны принимается такой, что вода не попадает на открытую палубу и изменение момента инерции действующей ватерлинии происходит только из-за развала бортов. В случае заливания палубы у судна, обладающего низким надводным бортом и большой протяжённостью открытой палубы, та часть последней, которая оказывается под водой, должна вычитаться из площади действующей ватерлинии, что приводит к уменьшению длины ватерлинии на длину заливания и ординат ватерлинии на заливаемом участке корпуса до нуля и дополнительно уменьшает упомянутый момент инерции. Одними из ключевых параметров остойчивости являются метацентрическая высота (GM) и, как следствие, плечи восстанавливающего момента (GZ), значения которых зависят от аппликаты метацентра, а значит – метацентрического радиуса. У судна, находящегося серединой корпуса на вершине волны, величина GM может упасть ниже лимитирующего значения (согласно циркуляру [2] оно составляет 0,05 м) или даже стать отрицательным. Если в это время внешний кренящий момент, воздействующий на судно, превысит восстанавливающий, судно потеряет остойчивость. Опасность усугубляется тем, что при потере остойчивости на вершине попутной волны судно имеет низкую относительную скорость по сравнению с фазовой скоростью волны, а значит, держится в этом положении относительно гребня достаточно долго, не имея запаса времени для восстановления остойчивости, которое произойдёт при смещении гребней волн вдоль корпуса в более благоприятное с точки зрения остойчивости положение. Для судов с протяженной открытой палубой и низким надводным бортом (low weather deck), таких как морские снабженцы (Offshore Supply Vessels — OSV) суда типа ULSTEIN P101, проблема «чистой» потери остойчивости тесно связана с этим эффектом. При этом наличие фальшбортов на открытой палубе может способствовать временному удержанию на ней воды, которая попадает туда при захлестывании палубы волнами с кормы. Присутствие воды на палубе создаёт двойственный эффект:

– Увеличение периода бортовой качки (при потере остойчивости – иногда до «зависания» судна на максимальном угле крена). Ухудшение

остойчивости уменьшает ускорения при качке и, соответственно, силы инерции, действующие на судно и всё, что на нём находится, включая людей, и таким образом формально повышает комфорт и безопасность в некоторых режимах плавания.

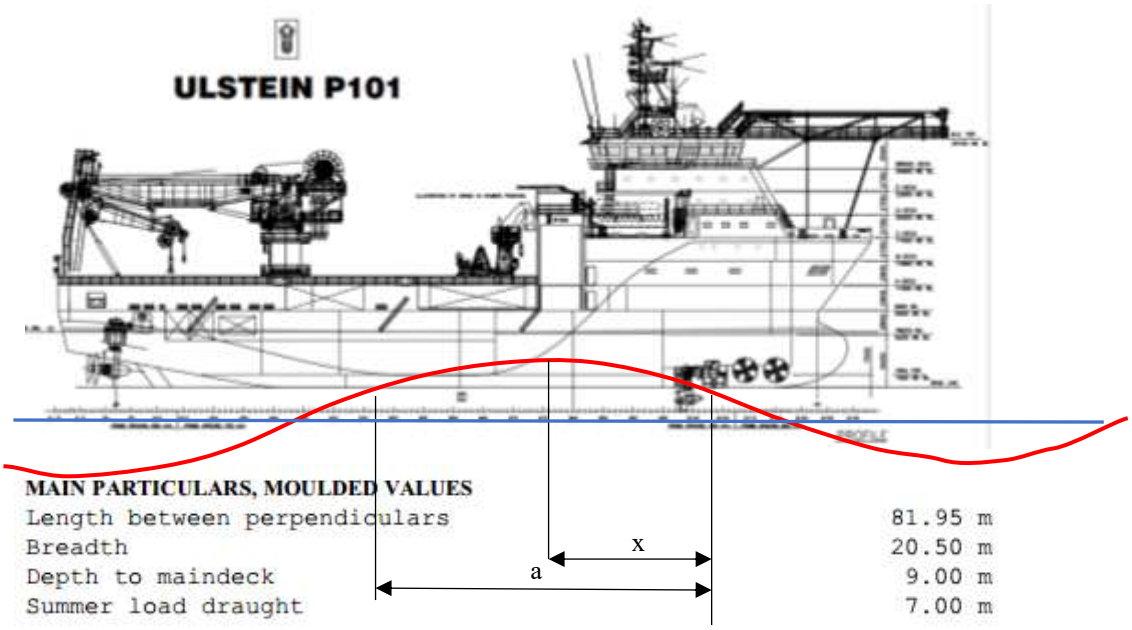
– Потеря или значительное снижение поперечной остойчивости сами по себе являются негативными факторами. При использовании в расчётах так называемого метода приёма груза вода, попавшая на палубу, расположенную выше ватерлинии, считается действующей, как жидкий груз с большой свободной поверхностью, «поднимая» центр тяжести всего судна. При использовании метода постоянного водоизмещения, как указано выше, учитывается уменьшение метацентрического радиуса из-за уменьшения момента инерции действующей ватерлинии, что формально «опускает» метацентр. В любом случае происходит уменьшение плеча восстанавливающего момента. В отличие от цистерн, ширина свободной поверхности на палубе ограничена только шириной судна, что создает максимально возможный отрицательный момент инерции свободной поверхности. Более того, в отличие от приема груза ниже ватерлинии (а точнее – нейтральной плоскости, находящейся в зависимости от метацентрической высоты ниже и вблизи или значительно ниже ватерлинии), где вес жидкости, даже имеющей свободную поверхность, частично улучшает остойчивость, прием воды на палубу всегда её уменьшает.

Оценка уязвимости по критерию «чистой» потери остойчивости для низкобортных судов с протяженной открытой палубой на примере судна «OLYMPIC INTERVENTION IV»

Основные характеристики и схематичное изображение судна представлены на рисунке 1. Модельные эксперименты, проведенные для судов типа OSV, показали, что классическая картина «чистой» потери остойчивости, предсказанная теорией, для судов с низким надводным бортом и длинной открытой палубой может не реализовываться. Вместо этого доминирующим фактором становится влияние заливания палубы. Было подтверждено, что для судов с длиной открытой палубы, составляющей более 0.4 длины между перпендикулярами (LPP) и отсутствием полного ограждения палубы фальшбортом, стандартные критерии «чистой» потери остойчивости применяться не должны, так как реальная опасность заключается в потере остойчивости из-за скопления воды на палубе. Для оценки степени дополнительного влияния заливания палубы на остойчивость в процессе эксплуатации судна с использованием имеющейся на борту документации можно предложить метод, описанный ниже. Примем следующие допущения:

– реальный профиль ветровой волны, близкий к несимметричной трохоиде, заменяется косинусоидой с амплитудой, равной половине высоты волны и осью абсцисс, находящейся на уровне ватерлинии на спокойной воде (красная линия на рис. 1),

– вертикальная качка отсутствует.



MAIN PARTICULARS, MOULDED VALUES

Length between perpendiculars	81.95 m
Breadth	20.50 m
Depth to maindeck	9.00 m
Summer load draught	7.00 m

DEADWEIGHT AT SUMMER LOAD DRAUGHT

Deadweight	3782 T
Block coefficient	0.703
Displacement, moulded	8479 T
Displacement, total	8517 T
Volume, moulded	8272 m3
Volume, total	8309 m3

Рис. 1. Схематичное изображение и общие характеристики судна «OLYMPIC INTERVENTION IV»

Уравнение такой косинусоиды можно записать в виде:

$$y = \frac{h}{2}\cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right), \quad (2)$$

где h – высота волны.

λ – длина волны.

y - вертикальное расстояние между уровнем спокойной воды при заданной осадке и уровнем воды на профиле волны в точках его пересечения с кромкой открытой палубы. В данном случае принимается равным высоте надводного борта на спокойной воде.

x – горизонтальное расстояние от вершины профиля волны до точки пересечения этого профиля с кромкой открытой палубы (половина длины заливаемой части палубы).

Приняв $2\pi = 360$, подставив значения h и λ и задавшись значением y , равным высоте надводного борта на спокойной воде, по формуле (2) можно найти значение x и длину заливаемой части палубы $a = 2x$. Тогда величина потерянного из-за заливания момента инерции действующей ватерлинии будет равна:

$$dI_x = \frac{aB^3}{12}, \quad (3)$$

где B – ширина судна.

Потеря метацентрической высоты из-за заливания палубы составит:

$$dGM = \frac{dI_x}{V}, \quad (4)$$

где V – объёмное водоизмещение судна при данной осадке.

В качестве примера приведём оценку влияния на «чистую» потерю остойчивости из-за заливания палубы для рассматриваемого судна волны с характеристиками, взятыми из таблицы распределения вероятности возникновения ветровых волн с определёнными высотами и периодами для Северной Атлантики, приведённой в [2]. Согласно этой таблице волны с $h = 4.5$ м и $\lambda = 87.8$ м (длина волны, соответствующая периоду 7.5 секунд, близкая к длине судна), которые в принципе могут обеспечить заливание палубы при высоте надводного борта 2 м (если принять, что судно сидит по летнюю осадку, см. его основные характеристики на рис. 1) обладают вероятностью появления около 1,4 % (1354 случая на 100000 наблюдений). По той же таблице вероятность появления волн с такой же длиной, но высотой 5,5 м составляет около 0,5 %, волны большей длины высотой 4,5 м с большой долей вероятности не будут заливать палубу (кроме случаев наличия гармонического резонанса качки), а волны меньшей длины будут обладать высотой, меньшей, чем удвоенная высота надводного борта на спокойной воде, что делает рассмотрение таких случаев с точки зрения темы данной статьи бессмысленным. По формуле (2) для рассматриваемой волны получаем x =6.5 м, по формуле (3) $dI_x = 455$ м^4, по формуле (4) $dGM = 0.055$ м. То есть из-за возможного заливания палубы при рассматриваемых параметрах волнения метацентрическая высота для данного судна при данной загрузке может уменьшится на 5,5 см по сравнению с метацентрической высотой на тихой воде с вероятностью 1,4%. При наличии теоретического чертежа судна можно найти ординаты точек пересечения его действующей ватерлинии на волне с теоретическими ватерлиниями в оконечностях корпуса и оценить дополнительную потерю остойчивости на волне из-за развала бортов по методике, изложенной в [5], после чего найти минимально допустимое значение метацентрической высоты на тихой воде для рассматриваемого судна при данной загрузке в заданных условиях волнения.

Заключение

Анализ проблемы «чистой» потери остойчивости для судов типа OSV показывает, что традиционные подходы к оценке безопасности, основанные только на диаграммах статической остойчивости, недостаточны. Заливание палубы и учёт влияния развала бортов на остойчивость на волне вносит коренные изменения в динамику поведения судна. С одной стороны, слой воды на палубе может выступать в роли демпфера качки, с другой — создает постоянную угрозу потери остойчивости из-за возникновения дополнительного кренящего момента и снижения запаса восстанавливающего момента. Для обеспечения безопасной эксплуатации судна «OLYMPIC INTERVENTION IV» необходим комплексный подход, включающий:

– Учет специфики архитектуры (наличие протяженной низкой палубы) при разных вариациях загрузки.

– Использование современных методов математического моделирования, учитывающих динамическое воздействие на остойчивость возможного наличия воды на палубе.

– Тщательный анализ разрешенных эксплуатационных режимов, особенно при движении на попутном волнении.

Только понимание сложных гидродинамических процессов, а не следование устаревшим упрощенным правилам, способно гарантировать безопасность экипажа и дорогостоящего оборудования в современных морских операциях.

Список литературы

1. International Code of Intact stability 2008. Fourth Edition. 2020 – URL: https://deckofficer.ru/titul/resolutions/item/imo-international-code-on-intact-stability / (дата обращения 11.05.2026).
2. MSC.1/Circular.1627 – Interim Guidelines on the Second Generation Intact Stability Criteria - URL:https://www.crclass.org/wp-content/uploads/2023/10/2-6-MSC.1-Circ.1627-Interim-Guidelines-On-The-Second-Generation-Intact-Stability-Criteria-Secretariat.pdf / (дата обращения 11.05.2026).
3. MSC.1/Circ.1652 26 - Explanatory notes to the Interim Guidelines on the Second Generation Intact Stability Criteria. - URL: https://puc.overheid.nl/PUC/Handlers/DownloadDocument.ashx?identifier=PUC_743708_14&versienummer=1&type=pdf&ValChk=H_CVidw_4r2094jI45UvwQTEqBT3USaMkmeb1fKvw5g1 / (дата обращения 11.05.2026).
4. Кутейников М.А. О возможности интеграции критериев остойчивости второго поколения ИМО в систему комплексного нормирования мореходности. Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2025;1(80): с. 64-74. EDN: EIPDXD.
5. Осокин М.В., Хвостов Р.С. Способ определения момента инерции ватерлинии для оценки остойчивости судна на волнении / Речной транспорт (XXI век). 2020. № 3 (95). С. 40-43.

References

1. International Code of Intact stability 2008. Fourth Edition. 2020 – URL: https://deckofficer.ru/titul/resolutions/item/imo-international-code-on-intact-stability / (data obrashcheniya 11.05.2026).
2. MSC.1/Circular.1627 – Interim Guidelines on the Second Generation Intact Stability Criteria - URL:https://www.crclass.org/wp-content/uploads/2023/10/2-6-MSC.1-Circ.1627-Interim-Guidelines-On-The-Second-Generation-Intact-Stability-Criteria-Secretariat.pdf / (data obrashcheniya 11.05.2026).
3. MSC.1/Circ.1652 26 - Explanatory notes to the Interim Guidelines on the Second Generation Intact Stability Criteria. - URL: https://puc.overheid.nl/PUC/Handlers/DownloadDocument.ashx?identifier=PUC_743708_14&versienummer=1&type=pdf&ValChk=H_CVidw_4r2094jI45UvwQTEqBT3USaMkmeb1fKvw5g1 / (data obrashcheniya 11.05.2026).
4. Kuteinikov M.A. O vozmozhnosti integratsii kriteriev ostoichivosti vtorogo pokolenija IMO v sistemu kompleksnogo normirovanija morekhodnosti. Nauchno-tekhnicheskiy sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva. 2025;1(80): p. 64-74. EDN: EIPDXD.
5. Osokin M. V., Zhukov M. V. Sposob opredelenija momenta inercii vaterlinii dlja ocenki ostoichivosti sudn na volnenii / Rechnoi transport (XXI vek). 2020.No. 3 (95). p. 40-43.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Осокин Михаил Викторович, к.т.н., доцент, доцент кафедры Судовождения и безопасности судоходства, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: capmo@mail.ru

Mikhail V. Osokin, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Navigation, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Жуков Максим Валерьевич, аспирант кафедры Судовождения и безопасности судоходства, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: zhukoff.m2016@yandex.ru

Maxim V. Zhukov, graduate student of the Department of Navigation , Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 26.05.2026; принята к публикации 22.06.2026; опубликована онлайн 20.09.2026. Received 26.05.2026; published online 20.09.2026.

УДК 656.076
DOI: 10.37890/jwt.vi88.735

Оптимизация оперативного планирования работы флота с применение информационных технологий

В.В. Фирсов
ORCID: 0009-0006-3152-2743
Ю.Н. Уртминцев
ORCID: 0009-0001-4534-4347
Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В данной статье рассматривается возможность сокращения расходов и повышения эффективности использования судов путем оптимальной расстановки флота с использованием математической модели и методов оптимизации. При планировании следующего рейса не всегда имеется подписанный договор: сделка может находиться на стадии переговоров. В рамках данной работы для планирования рейсов договоры были разделены на «чистые» сделки и заявки на перевозку. Экономико-математическая модель позволит максимизировать прибыль за счет оптимизации расстановки флота и подбора наиболее выгодных договоров – при условии, что имеющееся количество судов способно выполнить все «чистые» сделки. В расчетах учитываются условия этих рейсов, такие как laycan, работа портов в выходные дни, начало сталийного времени, район работы. Еще одной отличительной особенностью модели является то, что в заявках рассматривается конкретный проект судна. Это позволит в случае нехватки вычислительных мощностей сократить объем задачи. Другими словами, расчет ведется не по всему процессу целиком, а разбивается на подзадачи – обрабатываются только заявки, относящиеся к одному проекту. Помимо этого, в современных условиях приходится учитывать санкционные риски. Наличие соответствующих ограничений по странам, наложившим эти самые санкции, позволит более реалистично оценивать возможность выполнения конкретного рейса, конкретным судном.

Ключевые слова: оптимизация работы флота, оперативное планирование, экономико-математическая модель, планирование работы флота.

Optimization of fleet operational planning using information technologies

Viktor V. Firsov
ORCID: 0009-0006-3152-2743
Yuriy N. Urtmintsev
ORCID: 0009-0001-4534-4347
Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. This article considers the possibility of reducing costs and increasing the efficiency of vessel utilization through optimal fleet deployment using a mathematical model and optimization methods. When planning the next voyage, a signed contract is not always available; the deal may still be under negotiation. In this work, contracts for voyage planning were divided into clean recap and transportation requests. The economic-mathematical model aims to maximize profit by optimizing fleet deployment and selecting the most advantageous contracts, provided that the available fleet can fulfill all clean recaps. The calculations consider conditions such as laycan, port operations on weekends, commencement of laytime, and the operating region. In addition, a distinctive feature is that requests are associated with

a specific vessel project, which allows reducing the problem size in case of limited computer resources. In other words, the calculation is not performed for the entire process as a whole but is divided into sub-tasks, processing only requests related to a single project. Furthermore, in today's environment, sanctions risks must be taken into account. The existence of relevant restrictions for the countries that have imposed these sanctions will allow for a more realistic assessment of the feasibility of a specific voyage by a specific vessel.

Keywords: fleet operation optimization, operational planning, economic-mathematical model, fleet work scheduling

Введение

Основной целью любой коммерческой организации является получение прибыли. Транспортные компании, занимающиеся перевозкой различных видов грузов, в большинстве своем являются коммерческими организациями. Как всем известно, увеличить прибыль можно за счет роста доходов или за счет снижения расходов.

Современная экономика характеризуется большим спросом на транспортные услуги и не менее значительным количеством предложений по перевозке. На рынке существует конкуренция не только между судоходными компаниями, но и между транспортными организациями, занимающимися перевозкой грузов другими видами транспорта. Поэтому увеличить прибыль за счет повышения ставок на перевозку невозможно: это приведет к потере клиентов, а сама ставка фрахта «диктуется» рынком перевозок. В связи с этим транспортные компании стремятся к сокращению издержек и повышению эффективности использования транспорта.

В последние годы в условиях цифровизации морской отрасли наблюдается растущий интерес крупных судоходные компаний к внедрению методов оптимизации оперативного планирования работы флота. Это обусловлено необходимостью повышения эффективности использования флота, минимизации эксплуатационных расходов и укрепления конкурентных позиций судоходных предприятий.

В данной работе рассматривается возможность сокращения расходов и повышения эффективности использования судов в современных условиях с учетом особенностей договоров на перевозку – путем оптимальной расстановки флота с применением математической модели и методов оптимизации. Цель работы – повышение эффективности оперативного планирования работы флота с помощью методов оптимизации.

Основные понятия и виды планирования

Планирование включает в себя определение целей, разработку стратегий и тактик, выделение ресурсов, распределение задач и создание плановых документов. Целью планирования является достижение определенных результатов, обеспечение эффективного использования ресурсов и снижение неопределенности в процессе работы.

Оперативное планирование представляет собой более конкретную и краткосрочную форму планирования, которая ориентирована на достижение текущих целей и задач. Оно включает в себя конкретные действия и мероприятия, направленные на выполнение стратегических планов и достижение определенных результатов в ближайшем будущем.

Экономико-математические модели и методы оптимального оперативного планирования используются для повышения точности и эффективности процесса планирования. Они позволяют прогнозировать будущие события, оптимизировать распределение ресурсов и принимать экономически обоснованные решения. Эти модели и методы основываются на математических алгоритмах, статистических методах и экономической теории.

Применение экономико-математических моделей и методов оптимального оперативного планирования позволяет компаниям принимать решения на основе анализа данных и учета различных факторов. Они помогают оптимизировать использование ресурсов, минимизировать издержки и улучшить результаты деятельности компании.

Таким образом, экономико-математические модели и методы оптимального оперативного планирования играют важную роль в процессе планирования деятельности компаний, помогая им принимать обоснованные решения и достигать поставленных целей.

Процесс планирования [1] в организации начинается с четкого понимания того, что необходимо делать для ее эффективного развития и функционирования. Успех любого плана зависит от:

- качества целеполагания в ключевых вопросах развития организации – на основе анализа ее прошлого, настоящего и будущего, а также способности оперативно реагировать на изменения внешней среды;
- качества предварительного анализа деятельности организации, включая ее ценовую политику, состояние рынка, действия конкурентов, логистику товародвижения и другие значимые факторы;
- корректной оценки конкурентоспособности организации;
- выбора и успешной реализации стратегии развития, способствующей повышению конкурентоспособности организации.

В судоходных компаниях применяются следующие виды планирования: годовое, месячное и рейсовое.

Годовое планирование

Годовое планирование напрямую связано с бюджетированием. Каждая организация, независимо от размера, планирует и оценивает финансовые результаты своей деятельности.

Бюджет организации – это календарный план доходов и расходов, сформулированный в стоимостных и количественных величинах. Он служит инструментом принятия решений, планирования и контроля в процессе управления деятельностью компании. Бюджет составляется в натуральном и/или денежном выражении и определяет потребность компании в ресурсах, необходимых для получения прогнозируемых доходов.

Бюджетирование как неотъемлемая часть управленческого учета применяется для прогнозирования финансового результата компании, анализа плановых и фактических показателей с учетом отклонений.

Основными бюджетными формами являются: Бюджет доходов и расходов (БДР) и Бюджет движения денежных средств (БДДС). С их помощью руководитель может спланировать размер прибыли предприятия и эффективно распределить финансовые потоки [2].

БДР – это ключевой бюджет, который создается на будущий год (квартал) с целью планирования и управления доходами, расходами и прибылью предприятия. Ежемесячно финансовый директор контролирует исполнение бюджетных обязательств, сравнивая плановые данные с фактическими. Если отклонения от плановых сумм существенные, бюджет подлежит корректировке.

БДДС (бюджет движения денежных средств) служит для распределения финансовых потоков по местам хранения денежных средств (банковские счета, кассы и др.). Цель составления этого бюджета является управление платежеспособностью компании, а именно недопущение возникновения кассовых разрывов и предотвращение накопления денежных средств.

БДДС может составляться на год или полугодие, но с обязательной разбивкой по месяцам. БДДС, составленный на месяц и разбитый по дням, зачастую используется в качестве «Платежного календаря».

Месячное планирование

Основная задача месячного планирования – уточнение годового плана и обеспечение его выполнения. Можно считать, что месячное планирование – это оперативное планирование, конкретизирующее годовые задания на месячный период [3].

В нем уже более детально расписываются все элементы. Поскольку месячный план также связан с бюджетированием, в нем так же используются формы БДР и БДДС.

В судоходных компаниях в месячном плане работы флота уже происходит привязка к конкретному судну, а не к типу судна, как в годовом. Более детально расписывается сам рейс: количество планируемого груза, ставка фрахта (с большей точностью), порты погрузки и выгрузки.

Рейсовое планирование

Рейсовое планирование, так же как и месячное, является оперативным планированием и включает в себя детальный план конкретного рейса. Основное его отличие от месячного заключается в том, что данный план еще конкретнее описывает работу конкретного судна в данном рейсе.

Под рейсом в данном случае подразумевается транспортно-технологический цикл работы судна – от момента полного (в случае нескольких портов выгрузки) окончания выгрузки до момента полного окончания следующей выгрузки.

При составление рейсового плана учитываются все условия договора, такие как работа в выходные дни, конкретное наименование груза, нормы погрузи и выгрузки. Также планируется количество груза, которое будет погружено в данном рейсе.

Совершенствование оперативного планирования работы флота

В качестве направлений совершенствования оперативного планирования работы флота [4] можно выделить следующие крупные блоки:

– оптимальное рейсовое нормирование;
– непрерывное планирование работы флота;
– автоматизация расчета оперативных планов работы флота.

Оптимальное рейсовое нормирование

Нормирование времени следования – это процесс управления, задачей которого является определение скоростей движения судов при заданных направлении перевозок, условиях плавания и параметрах судна. Традиционно этот процесс осуществляется вне процессов оперативного управления. Поэтому нормы времени следования рассчитываются исходя из некоторых средних параметров транспортного процесса.

Это означает, во-первых, недостаточную точность самих норм, а во-вторых, отсутствие какой-либо оптимизации самой значимой части эксплуатационных затрат – затрат на топливо.

Одним из способов повышения эффективности работы флота является регулирование скорости движения судов с учетом складывающейся оперативной обстановки в портах (готовность груза, готовность причалов и др.).

Одним из направлений совершенствования оперативного управления является объединение процессов нормирования и рейсового планирования в единый процесс

оптимального рейсового планирования, осуществляемый на базе специализированной компьютерной системы.

Непрерывное планирование работы флота

Основной аргумент для принятия непрерывного планирования [4] является повышение адекватности планирования. Максимально адекватный план должен быть календарным и оперировать конкретными судами или группами судов на направлениях перевозок, а также описывать работу всех судов в течение производственного периода. Это позволит получать эффект от принимаемых решений за рамками декады. Непрерывное планирование является особым видом оперативного планирования.

Для повышения адекватности требуется также учет:

– влияния текущих путевых условий на движение судов;

– динамики транспортного процесса.

Для описания сложной динамической системы применяются имитационные модели. В 1970-х и 1980-х годах проводились попытки применения таких моделей на речном транспорте, однако они не увенчались успехом из-за низкой производительности вычислительных машин. В современных условиях возможности информационных технологий достаточны для моделирования динамической транспортной системы в оперативном режиме.

Можно выделить 5 принципов, которым должна соответствовать современная концепция непрерывного планирования [5]:

1) планирование осуществляется в форме календарного графика работы флота персонально по каждому судну;

2) метод расчета плана работы флота не зависит от горизонта планирования;

3) обновление плана осуществляется при любом значимом изменении эксплуатационной обстановки по сравнению с прогнозами;

4) разработка плана может быть проведена для произвольного горизонта планирования;

5) разработка плана осуществляется с учетом оптимального нормирования ходовой операции персональных рейсооборотов.

Для разработки метода расчета непрерывного плана, основанного на этих принципах, необходимо решить следующие проблемы:

1) требуется построение автоматизированной имитационной модели работы флота, не требующей алгоритмической перестройки при изменении параметров;

2) необходима разработка эвристического алгоритма календарного планирования, использующего метод оптимального нормирования и автоматизированную имитационную модель.

Автоматизация расчета оперативных планов работы флота

Автоматизация расчета оперативных планов является упрощенной версией непрерывного планирования. Основное отличие заключается в том, что не все данные заносятся автоматически, как при непрерывном планировании, а пересчет происходит только после нажатия сотрудником соответствующей кнопки.

Для реализации непрерывного планирования и автоматизации расчета оперативных планов необходимо составить экономико-математическую модель работы флота. Экономико-математическая модель представляет собой математическое описание экономического процесса или объекта (в нашем случае – транспортного процесса), выполненное в целях их исследования и управления.

Существует ряд работ, которые в той или иной степени описывают процесс планирования работы флота. Авторами таких работ являются: Ширяев Е. В. [6], Разживин И.Н., Захаров В. Н. [7], Платов Ю.И. [8], Платов А.Ю. [9], Корьев В.Ю. [10] и другие. Однако их работы так и не получили практической реализации по различным причинам. Основная причина – отсутствие достаточного уровня развития информационных технологий на тот момент. Помимо этого, большинство работ рассматривают вопрос в период плановой экономики и с переходом к рыночным отношениям не могут быть применены к существующей системе планирования работы флота из-за неопределенности в объемах перевозок и потребности во флоте. В результате работа судоходных компаний была переориентирована на новые условия, что потребовало сосредоточить внимание на поиске грузовладельцев (фрахтователей), обеспечении качества перевозок, выполнении договорных обязательств, а также на гибкости в экономических и технологических аспектах. Компании стали стремиться снизить себестоимость перевозок и минимизировать простои флота. При этом рейс судна стал основным производственным циклом.

К более современным моделям можно отнести:

- экономико-математическая модель оперативного планирования работы флота;
- модель выбора рейсовых назначений и адаптации существующих алгоритмов оптимизации режима движения в рамках методики непрерывного регулирования.

Первая модель [11] позволяет произвести оптимальную расстановку флота, но не учитывает условия договора на перевозку и подходит для случаев, когда заранее известно, что имеющийся флот может выполнить все рейсы. Иными словами, она рассматривает только уже заключенные с фрахтователями договоры и никак не учитывает ситуации, когда необходимо выбрать, какую сделку выгоднее заключить. Помимо этого, в модели не учтена специфика проекта судов. Кроме того, данная задача больше подходит для речных перевозок, поскольку не учитывает особенностей морских перевозок – например, портовых и канальных сборов, времени ожидания прохождения проливов.

Вторая модель [10] ориентирована на перевозки танкерным флотом и учитывает некоторые их особенности. Однако в ней не учтены условия договоров на перевозку, такие как режим работы в выходные дни, начало сталийного времени, а также не учтены санкционные ограничения, вопрос которых стал очень актуален в последнее время. Также остается неясным, как оценивать эффективность работы в ситуации, когда одно судно выполняет длинный рейс, другой – короткий, а третий находится на простое без рейса: затрачиваемое время на эти рейсы существенно различается. Кроме того, данный подход применим только для анализа уже заключенных договоров и не предусматривает выбора наиболее выгодных сделок из потенциально возможных вариантов. Ограничения по бункеровке больше подходят для небольших рейсов и не учитывают вместимость самих топливных танков каждого конкретного судна в данный момент, так как при длительных морских переходах возникают ситуации дополнительной, повторной бункеровки во время рейса в целях оптимизации и минимизации расходов на топливо.

Экономико-математическое описание разработки автоматизации оперативного планирования работы флота

В результате анализа существующих моделей в рамках данной работы разработана следующая модель. Экономико-математическое описание автоматизации оперативного планирования работы флота рассматривает ситуацию при планировании рейсов, следующих после завершения текущего. Под рейсом будем

понимать транспортно-технологический цикл работы судна – от момента полного (в случае нескольких портов выгрузки) окончания выгрузки до момента полного окончания следующей выгрузки. При планировании следующего рейса не всегда имеется подписанный договор: сделка может находиться на стадии переговоров. В рамках данной задачи для планирования рейсов договоры разделим на «чистые сделки» и заявки на перевозку.

«Чистая сделка» – это уже существующий договор на перевозку (charter party, в дальнейшем – CP), то есть обе компании подтверждают заключение договора с прописанными условиями и берут на себя обязательства их выполнить. Важно отметить, что не все CP оформляются на одну конкретную перевозку. В случае наличия большой партии груза для перевозки необходимо заранее разбить данный договор на отдельные заявки. На практике в таких договорах, как правило, все равно оговариваются между фрахтователем и судовладельцем период подачи судна и количество груза. Это необходимо, поскольку в любом случае требуется заранее подготовить партию груза к отправке, а покупатель груза не всегда найден на момент заключения договора.

Под заявкой будем понимать все сделки, находящиеся на стадии переговоров. В данном случае у компаний еще нет обязательств друг перед другом, но это потенциальные CP, не учитывать которые было бы нецелесообразно.

Итак, после введения новых понятий необходимо разобрать, как ими пользоваться. CP – это сделки, которые необходимо обязательно выполнить. Заявки же не обязательны для выполнения, и, соответственно, необходимо выбрать наиболее подходящие, то есть наиболее выгодные.

Если с CP можно просто управлять расстановкой флота, то с заявками, помимо оптимизации расстановки флота, необходимо выбрать наиболее прибыльные варианты. Для определения более выгодной сделки будем опираться на тайм-чартерный эквивалент (Time Charter Equivalent, TCE).

В настоящее время из-за усложнившейся политической ситуации правительства стран Запада ввели санкции в отношении России. Эти ограничения существенно влияют на планирование работы флота и требуют от судоходных компаний в целом и операторов в частности высокой гибкости и адаптивности. Основными источниками санкционных ограничений выступают: Великобритания (UK), Европейский союз (EU) и Соединенные Штаты Америки (OFAC). При этом санкции США оказывают наибольшее воздействие, поэтому при планировании работы флота необходимо учитывать их влияние в зависимости от типа ограничений. Если санкции наложены на саму компанию, все ее суда получают соответствующую пометку. При проверке судна анализируются данные: регистрационного судовладельца; коммерческого оператора; технического оператора; исполняющего судовладельца (при его наличии).

Для решения данной модели рекомендуется использовать функцию поиска решений MS Excel. В качестве метода оптимизации можно применить любой алгоритм, представленный в библиотеке поиска решений. По сути, основная задача работы заключается в сборе, систематизации и обработке исходных данных таким образом, чтобы в итоге сформировать базу данных (таблицу), в которой описаны все возможные варианты расстановки флота с учетом условий подбора судов.

Затем необходимо составить таблицу ограничений для того, чтобы поиск решения при максимизации целевой функций выполнял все заявки, и исключал повторного назначения судов. Для данного этапа работы мы принимаем, что судно можно назначить только на один рейс вперед.

В связи с этим можно выделить следующие элементы:

1) ***Постановка задачи.*** Требуется определить расстановку судов, обеспечивающую максимальную эффективность работы флота.

2) ***Исходные данные.*** Список судов, характеристика судов, текущая дислокация, условия договоров на перевозку, расстояние между портами.
3) ***Целевая функция.*** Суммарный TCE должен стремиться к максимуму.

$$\sum_{j\in J}\sum_{i\in I}(\Pi_{ij} * X_{ij}) / \sum_{j\in J}\sum_{i\in I}(t_{ij}^{\text{р}} * X_{ij}) \to max \quad (1)$$

где X_{ij} – назначение судна *i*-го судна на *j*-й рейс (либо 0, либо 1);

i – индекс судна;

I – множество судов, рассматриваемых в рамках задачи;

j – индекс рейса;

J – множество рейсов (чистые сделки и заявки), рассматриваемых в рамках задачи.

Расчет технико-экономических показателей.

Для каждого судна TCE выглядит следующим образом:

$$TCE_{ij} = \frac{\Pi_{ij}}{t_{ij}^{\text{р}}}, \text{USD/сут.} \quad (2)$$

где Π_{ij} – рейсовый результат *i*-го судна по *j*-му рейсу;

$t_{ij}^{\text{р}}$ – время рейса *i*-го судна по *j*-му рейсу.

Рейсовый результат *i*-го судна по *j*-му рейсу определяется по формуле:

$$\Pi_{ij} = Д_{ij} - Э_{ij}^{\text{расх}}, \text{USD} \quad (3)$$

где $Д_{ij}$ – доход *i*-го судна по *j*-ому рейсу;

$Э_{ij}^{\text{расх}}$ – рейсовые расходы *i*-го судна по *j*-му рейсу

Доход *i*-го судна по *j*-му рейсу выглядит следующим образом:

$$Д_{ij} = Q_{эij}^{\text{план}} * d_j * (1 - K_j), \text{USD} \quad (4)$$

где $Q_{эij}^{\text{план}}$ – плановая загрузка *i*-го судна по *j*-му рейсу, т;

d_j – ставка фрахта по *j*-му рейсу, USD/т;

K_j – комиссия по *j*-му рейсу, доли ед.

В случае, когда ставка фрахта указана за перевозку в целом (lumsum), то доход от перевозки выглядит следующим образом:

$$Д_{ij} = d_j * (1 - K_j), \text{USD} \quad (5)$$

Рейсовые расходы *i*-го судна по *j*-му рейсу определяются по формуле:

где $\sum Э_{ij}^{\text{топ}}$ – расходы на топливо *i*-го судна по *j*-му рейсу;

$\sum Э_{ij}^{PDA}$ – расходы на судозаходы в порты *i*-го судна по *j*-му рейсу;

$\sum Э_{ij}^{\text{канал}}$ – расходы на прохождение каналов/проливов *i*-го судна по *j*-му рейсу. К ним относится прохождение Керченского пролива, Босфор, Дарданеллы, Суэцкий канал и т.д.;

$\sum Э_{ij}^{\text{пр}}$ – прочие расходы.

Основную долю рейсовых расходов составляют расходы по топливу. Поэтому важно использовать наиболее точные методы для их расчета.

Расходы на топливо *i*-го судна по *j*-му рейсу:

$$\sum Э_{ij}^{\text{топ}} = \sum Э_{ij}^{MGO} + \sum Э_{ij}^{VLSFO} + \sum Э_{ij}^{ULSFO}, \text{USD} \quad (7)$$

где $\sum Э_{ij}^{MGO}$ – стоимость дизельного топлива (MGO) *i*-го судна по *j*-му рейсу;

$\sum Э_{ij}^{VLSFO}$ – стоимость мазута с серой менее 0,5% (VLSFO) *i*-го судна по *j*-му рейсу;

$\sum Э_{ij}^{ULSFO}$ – стоимость мазута с серой менее 0,1% (ULSFO) *i*-го судна по *j*-му рейсу.

VLSFO и ULSFO это тяжелое топливо, которое в основном используется главными двигателями (ГД). ULSFO применяется в зоне SECA (Sulfur Emission

Control Areas - это зоны, в которых введен запрет на использование высокосернистого топлива, в которую входят акватории Северного и Балтийского морей, пролив Ла-Манш, Карибское, Средиземное море и 200-мильные зоны США и Канады). Однако, не все ГД способны использовать данное топливо в качестве основного, особенно это касается южного региона (Черное, Мраморное моря Средиземное и т.д.) и такие суда используют в качестве основного топлива MGO.

MGO – это легкое топливо, которое применяется для работы дизель-генераторов (ДГ) и котлов. Однако на некоторых судах установлен валогенератор, что позволяет им не использовать MGO.

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать вывод, что используемый вид топлива зависит от типа судна и зоны его эксплуатации. Математически расход топлива в общем виде можно описать по процессам следующим образом:

$$\sum N_{ijk}^{\text{топ}} = \sum N_{ijk}^{\text{топ ГД}} + \sum N_{ijk}^{\text{топ ДГ}} + \sum N_{ijk}^{\text{топ К}}, \text{ т} \quad (8)$$

где $\sum N_{ijk}^{\text{топ ГД}}$ – общее количество топлива на ГД *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу;

$\sum N_{ijk}^{\text{топ ДГ}}$ – общее количество топлива на ДГ *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу;

$\sum N_{ijk}^{\text{топ К}}$ – общее количество топлива на котел *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу.

Общее количество топлива на ГД *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу:

$$\sum N_{ijk}^{\text{топ ГД}} = \sum N_{ijk}^{\text{топ ГД бл}} + \sum N_{ijk}^{\text{топ ГД гр}} + \sum N_{ijk}^{\text{топ ГД ман}}, \text{ т} \quad (9)$$

где $\sum N_{ijk}^{\text{топ ГД бл}}$ – общее количество топлива на ГД *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу в балласте;

$\sum N_{ijk}^{\text{топ ГД гр}}$ – общее количество топлива на ГД *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу в грузу;

$\sum N_{ijk}^{\text{топ ГД ман}}$ – общее количество топлива на ГД *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу на маневрах.

Общее количество топлива на ГД *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу в балласте:

$$\sum N_{ijk}^{\text{топ ГД бл}} = \sum N_{ijk}^{\text{топ ГД бл мор}} + \sum N_{ijk}^{\text{топ ГД бл ост.уч}}, \text{ т} \quad (10)$$

где $\sum N_{ijk}^{\text{топ ГД бл мор}}$ – общее количество топлива на ГД *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу в балласте на морских участках;

$\sum N_{ijk}^{\text{топ ГД бл ост.уч}}$ – общее количество топлива на ДГ *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу в балласте на остальных участках.

Общее количество топлива на ГД *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу в балласте на морских участках:

$$\sum N_{ijk}^{\text{топ ГД бл мор}} = \sum N_{ijk}^{\text{топ ГД бл мор } SECA} + \sum N_{ijk}^{\text{топ ГД бл мор ост.рн}}, \text{ т} \quad (11)$$

где $\sum N_{ijk}^{\text{топ ГД бл мор } SECA}$ – общее количество топлива на ГД *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу в балласте на морских участках в зоне SECA;

$\sum N_{ijk}^{\text{топ ГД бл мор ост.рн}}$ – общее количество топлива на ДГ *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу в балласте на морских участках в остальных районах.

Общее количество топлива на ГД *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу в балласте на остальных участках:

$$\sum N_{ijk}^{\text{топ ГД бл ост.уч}} = \sum N_{ijk}^{\text{топ ГД бл ост.уч } SECA} + \sum N_{ijk}^{\text{топ ГД бл ост.уч ост.рн}}, \text{ т} \quad (12)$$

где $\sum N_{ijk}^{\text{топ ГД бл ост.уч } SECA}$ – общее количество топлива на ГД *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу в балласте на остальных участках в зоне SECA;

$\sum N_{ijk}^{\text{топ ГД бл ост.уч ост.рн}}$ – общее количество топлива на ДГ *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу в балласте на остальных участках в остальных районах.

Общее количество топлива на ГД *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу в грузу:

$$\sum N_{ijk}^{\text{топ ГД гр}} = \sum N_{ijk}^{\text{топ ГД гр мор}} + \sum N_{ijk}^{\text{топ ГД гр ост.уч}}, \text{ т} \quad (13)$$

где $\sum N_{ijk}^{\text{топ ГД гр мор}}$ – общее количество топлива на ГД *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу в грузу на морских участках;

$\sum N_{ijk}^{\text{топ ГД гр ост.уч}}$ – общее количество топлива на ДГ *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу в грузу на остальных участках.

Общее количество топлива на ГД *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу в грузу на морских участках:

$$\sum N_{ijk}^{\text{топ ГД гр мор}} = \sum N_{ijk}^{\text{топ ГД гр мор } SECA} + \sum N_{ijk}^{\text{топ ГД гр мор ост.рн}}, \text{ т} \quad (14)$$

где $\sum N_{ijk}^{\text{топ ГД гр мор } SECA}$ – общее количество топлива на ГД *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу в грузу на морских участках в зоне SECA;

$\sum N_{ijk}^{\text{топ ГД гр мор ост.рн}}$ – общее количество топлива на ДГ *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу в грузу на морских участках в остальных районах.

Общее количество топлива на ГД *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу в грузу на остальных участках:

$$\sum N_{ijk}^{\text{топ ГД гр ост.уч}} = \sum N_{ijk}^{\text{топ ГД гр ост.уч } SECA} + \sum N_{ijk}^{\text{топ ГД гр ост.уч ост.рн}}, \text{ т} \quad (15)$$

где $\sum N_{ijk}^{\text{топ ГД гр ост.уч } SECA}$ – общее количество топлива на ГД *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу в грузу на остальных участках в зоне SECA;

$\sum N_{ijk}^{\text{топ ГД бл ост.уч ост.рн}}$ – общее количество топлива на ДГ *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу в грузу на остальных участках в остальных районах.

Общее количество топлива на котел *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу на маневрах:

$$\sum N_{ijk}^{\text{топ ГД ман}} = \sum N_{ijk}^{\text{топ ГД ман } SECA} + \sum N_{ijk}^{\text{топ ГД ман ост.рн}}, \text{ т} \quad (16)$$

где $\sum N_{ijk}^{\text{топ ГД ман } SECA}$ – общее количество топлива на ГД *i*-го судна по *j*-му рейсу по

k-му топливу на маневрах на остальных участках в зоне SECA;

$\sum N_{ijk}^{\text{топ ГД ман ост.рн}}$ – общее количество топлива на ДГ *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу на маневрах на остальных участках в остальных районах.

Количество топлива на ГД для всех вышеописанных операций определяется следующим образом:

$$N_{ijk}^{\text{топ ГД}} = n_{ik}^{\text{ГД}} * t_{ijk}(S_{ijk}) * k_{ij} * \gamma, \text{ т} \quad (17)$$

где $n_{ik}^{\text{ГД}}$ – норматив расхода топлива на ГД *i*-го судна по *k*-му топливу в зависимости от операции, т/сут(км);

$t_{ijk}(S_{ijk})$ – расчетное время (расстояние) *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу в зависимости от операции, сут(км);

k_{ij} – коэффициент, учитывающий увеличение/уменьшение нормы расхода топлива в зависимости от загрузки *i*-го судна по *j*-му рейсу в зависимости от операции;

γ – коэффициент, учитывающий разности энергоемкости легкого и тяжелого топлива. Как правило, норма расхода топлива, при использовании MGO в качестве основного ниже на 6% чем при использовании VLSFO или ULSFO.

Общее количество топлива на ДГ *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу:

$$\sum N_{ijk}^{\text{топ ДГ}} = \sum N_{ijk}^{\text{топ ДГ ход}} + \sum N_{ijk}^{\text{топ ДГ ст}} + \sum N_{ijk}^{\text{топ ДГ ман}}, \quad (18)$$

где $\sum N_{ijk}^{\text{топ ДГ ход}}$ – общее количество топлива на ДГ *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу в ходу;

$\sum N_{ijk}^{\text{топ ДГ ст}}$ – общее количество топлива на ДГ *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу в грузу;

$\sum N_{ijk}^{\text{топ ДГ ман}}$ – общее количество топлива на ДГ *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-ому топливу на маневрах.

Каждую из составляющих формулы (18) можно расписать следующим образом.

$$\sum N_{ijk}^{\text{топ ДГ ход}} = \sum N_{ijk}^{\text{топ ДГ ход } SECA} + \sum N_{ijk}^{\text{топ ДГ ход ост.рн}}, \text{ т} \quad (19)$$

$$\sum N_{ijk}^{\text{топ ДГ ст}} = \sum N_{ijk}^{\text{топ ДГ ст } SECA} + \sum N_{ijk}^{\text{топ ДГ ст ост.рн}}, \text{ т} \quad (20)$$

$$\sum N_{ijk}^{\text{топ ДГ ман}} = \sum N_{ijk}^{\text{топ ДГ ман } SECA} + \sum N_{ijk}^{\text{топ ДГ ман ост.рн}}, \text{ т} \quad (21)$$

где $\sum N_{ijk}^{\text{топ ДГ ход/ст/ман } SECA}$ – общее количество топлива на ДГ *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу в ходу/стоянке/маневрах в зоне SECA;

$\sum N_{ijk}^{\text{топ ДГ ход/ст/ман ман ост.рн}}$ – общее количество топлива на ДГ *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу в ходу/стоянке/маневрах в остальных районах.

Количество топлива на ДГ для всех вышеописанных операциях определяется следующим образом:

$$dN_{ijk}^{\text{топ ДГ}} = n_{ik}^{\text{ДГ}} * t_{ijk}, \text{ т} \quad (22)$$

где $n_{ik}^{\text{ДГ}}$ – норматив расхода топлива на ДГ *i*-го судна по *k*-му топливу в зависимости от операции, т/сут;

t_{ijk}– асчетное время *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу в зависимости от операции, сут.

Общее количество топлива на котел определяется аналогично количеству топлива на ДГ, за исключением формулы 22. Количество топлива на котел для всех операций определяется следующим образом:

$$dN_{ijk}^{\text{топ К}} = n_{ik}^{\text{К}} * t_{ijk} * \gamma, \text{ т} \quad (23)$$

где $n_{ik}^{\text{К}}$ – норматив расхода топлива на котел *i*-го судна по *k*-му топливу в зависимости от операции, т/сут;

t_{ijk}– расчетное время *i*-го судна по *j*-му рейсу по *k*-му топливу в зависимости от операции, сут;

Расходы на судозаходы в порты *i*-го судна по *j*-му рейсу:

$$\sum Э_{ij}^{PDA} = Э_{ij}^{PDA\ \text{погр}} + Э_{ij}^{PDA\ \text{выгр}}, \text{ USD} \quad (24)$$

где $Э_{ij}^{PDA\ погр}$ – стоимость портовых сборов в порту погрузки *i*-го судна по *j*-му рейсу, USD;

$Э_{ij}^{PDA\ выгр}$ – стоимость портовых сборов в порту выгрузки *i*-го судна по *j*-му рейсу, USD.

Общее время рейса выглядит следующим образом:

$$t_{ij}^{р} = \sum t_{ij}^{ход} + \sum t_{ij}^{стоянки}, \text{ сут} \quad (25)$$

где $\sum t_{ij}^{ход}$ – общее время в ходу *i*-го судна по *j*-му рейсу;

$\sum t_{ij}^{стоянки}$ – общее время на стоянках *i*-го судна по *j*-му рейсу.

Общее время в ходу *i*-го судна по *j*-му рейсу:

$$\sum t_{ij}^{ход} = t_{ij}^{балл.переход} + t_{ij}^{в\ грузу}, \text{ сут} \quad (26)$$

где $t_{ij}^{балл.переход}$ – время балластного перехода *i*-го судна по *j*-му рейсу, сут;

$t_{ij}^{в\ грузу}$ – время на следование в грузу *i*-го судна по *j*-му рейсу, сут.

Общее время на стоянках *i*-го судна по *j*-му рейсу:

$$\sum t_{ij}^{стоянки} = t_{ij}^{LC} + t_{ij}^{CLT\ погр} + t_{i}^{откатка\ балл} + t_{ij}^{погр} + t_{ij}^{SSHEX\ погр} + \sum t_{ij}^{ст\ в\ ходу} + t_{ij}^{CLT\ выгр} + t_{ij}^{выгр} + t_{ij}^{SSHEX\ выгр} + t_{ij}^{пр}, \text{ сут} \quad (27)$$

где t_{ij}^{LC} – время ожидание начала LayCan *i*-о судна по *j*-му рейсу, сут;

$t_{ij}^{CLT\ погр}$ – время ожидание начала сталийного времени (commencement lay time) на погрузке *i*-го судна по *j*-му рейсу, сут;

$t_{i}^{откатка\ балл}$ – время на откатку балласта *i*-го судна (зависит от проекта судна, исходные данные), сут;

$t_{ij}^{погр}$ – время погрузки *i*-го судна по *j*-му рейсу, сут;

$t_{ij}^{SSHEX\ погр}$ – время ожидание выходных и праздничных дней на погрузке *i*-го судна по *j*-му рейсу, сут;

$\sum t_{ij}^{ст\ в\ ходу}$ – время всех стоянок в ходу *i*-го судна по *j*-му рейсу, сут;

$t_{ij}^{CLT\ выгр}$ – время ожидание начала сталийного времени (commencement lay time) на выгрузке *i*-го судна по *j*-му рейсу, сут;

$t_{ij}^{выгр}$ – время выгрузки *i*-го судна по *j*-му рейсу, сут;

$t_{ij}^{SSHEX\ выгр}$ – время ожидание выходных и праздничных дней на выгрузке *i*-го судна по *j*-му рейсу, сут;

$t_{ij}^{пр}$ – прочие стоянки, сут.

Для подсчета всех показателей необходимо сначала спрогнозировать время окончание рейса:

$$T_{i0}^{завер\ прог} = \sum_{\square} t_{in}^{опер} + T_{\square}^{дислок}, \text{ сут} \quad (28)$$

где$T_{i0}^{завер\ прог}$ – прогнозное дата и время завершение текущего рейса, сут;

$\sum_{\square} t_{in}^{опер}$– сумма времени оставшихся операций, сут;

$T_{\square}^{дислок}$ – дата и время начала планирования, сут;

На практике в современных морских перевозках невозможно точно предсказать окончание конкретной операции, и часто используется понятие «проспекты» по погрузке, выгрузке судна, так как наибольшая неопределенность относительно плановых значений находится именно в портовых операциях. К примеру, постановка судна к причалу может быть как с ходу – в случае готовности груза, порта и причала, – так и с ожиданием на рейде в течение достаточно длительного времени. Стоит отметить, что в договорах на перевозку существует понятие сталийного времени,

которое регламентирует время нахождения в порту, и все время, потраченное свыше, оплачивается по ставке демереджа. Однако это покрывает только расходы по текущему рейсу, но может значительно изменить время его завершения, что, в свою очередь, может привести к опозданию под следующую позицию.

В связи с этим на практике чаще всего прогнозированием окончания операции и рейса занимается служба эксплуатации флота, которая владеет наиболее свежей, актуальной и точной информацией. Исходя из этого, на практике $T_{i0}^{\text{завер прог}}$ определяется судовыми операторами (менеджерами по эксплуатации) вручную, что является наиболее надежным и достоверным вариантом, учитывающим наибольшее количество как объективных, прогнозируемых, так и непредвиденных факторов. Исходя из этого, в рамках данной работы, $T_{i0}^{\text{завер прог}}$ должен учитываться как исходные данные, при изменении которых может производиться пересчет данной модели.

Исходя из прогнозного времени завершения текущего рейса, можно определить дату подачи судна.

$$T_{ij}^{\text{под след рейс}} = T_{i0}^{\text{завер прог}} + t_{ij}^{\text{балл.переход}}, \text{ сут} \quad (29)$$

где $t_{ij}^{\text{балл.переход}}$ – время на порожний переход *i*-го судна для *j*-й заявке, сут.;

Время на ожидание начала подачи *i*-го судна по *j*-му рейсу определяется в зависимости от даты и времени начала подачи судна на *j*-ом рейсе и даты, и времени подачи i-го судна под *j*-му рейсу:

$$\text{Если } T_j^{\text{ЛД}} > T_{ij}^{\text{под след рейс}}, \text{ то } t_{ij}^{LC} = T_j^{\text{ЛД}} - T_{ij}^{\text{под след рейс}}. \quad (30)$$

$$\text{Если } T_j^{\text{ЛД}} \le T_{ij}^{\text{под след рейс}}, \text{ то } t_{ij}^{LC} = 0 \quad (31)$$

где $T_j^{\text{ЛД}}$ – дата и время начала подачи судна на *j*-му рейсу (исходные данные);

Время, затрачиваемое на погрузку/выгрузку:

$$t_{ij}^{\text{погр/выгр}} = Q_{\text{э}ij}^{\text{план}} / \text{Б}_{\text{с-сут}}^{\text{погр/выгр}}, \text{ сут} \quad (32)$$

где $\text{Б}_{\text{с-сут}}^{\text{погр/выгр}}$ – норма погрузки/выгрузки по *j*-ому рейсу (исходные данные), т/сут.;

В договорах на перевозку важное место занимает учет сталийного времени. Сталийное время – это время, за которое фрахтователь обязуется погрузить или выгрузить судно без дополнительных к фрахту платежей. В случае превышения данного времени фрахтователь обязуется выплатить судовладельцу плату за контрсталийное время (демередж). В связи с этим в СР прописываются порядок расчета в случае, если сталийное время попадает на выходные и праздничные дни, а также условия начала сталийного времени.

Как правило сталийное время начинается с 08:00 (8/24 = 1/3 ≈ 0,333 суток) или 14:00 (14/24 ≈ 0,583 суток) рабочего дня и зависит от времени подачи нотиса о готовности (notice of readiness или NOR). Для математического описания введем следующие обозначение:

дроб (T) – дробная часть числа T (доля текущих суток, от 0 до 1);

цел (T) – целая часть числа T (количество полных суток).

Исходя из новых обозначений, математическое описание начала сталийного времени при условии SHINC и при условии, что NOR может быть подан в любое время, можно описать следующим образом:

$$\text{Если } \frac{8}{24} < \text{дорб}(T_{ij}^{NOR}) < \frac{12}{24}, \text{ то } T_{ij}^{CLT} = \text{цел}\left(T_{ij}^{NOR}\right) + \frac{14}{24} \quad (33)$$

$$\text{Если дорб}(T_{ij}^{NOR}) > \frac{12}{24}, \text{ то } T_{ij}^{CLT} = \text{цел}\left(T_{ij}^{NOR}\right) + 1 + \frac{8}{24} \quad (34)$$

$$\text{Если дорб}(T_{ij}^{NOR}) < \frac{8}{24}\text{, то } T_{ij}^{CLT} = \text{цел}\left(T_{ij}^{NOR}\right) + \frac{8}{24} \quad (35)$$

$$t_{ij}^{CLT} = T_{ij}^{CLT} - T_{ij}^{NOR} \quad (36)$$

где дорб(T_{ij}^{NOR}) – дробная часть времени подачи NOR *i*-го судна по *j*-му рейсу, сут;

цел$\left(T_{ij}^{NOR}\right)$ – целая часть времени подачи NOR *i*-го судна по *j*-му рейсу, сут;

T_{ij}^{CLT} – момент начала сталийного времени *i*-го судна по *j*-му рейсу, сут.

Время ожидания выходных и праздничных дней зависит от условий грузовых работ. Рассмотрим следующие виды расчета сталийного времени:

SHINC – выходные и праздничные дни включаются в расчет сталийного времени (Sunday and Holidays included).

SSHEX – суббота, воскресенье и праздничные дни исключаются из расчета сталийного времени (Saturday, Sunday and Holidays excepted)

SHEX – воскресенье и праздничные дни исключаются из расчета сталийного времени (Sunday and Holidays excepted).

Следует отметить, что в некоторых странах (в основном в арабских) выходными днями считаются пятница и суббота, а воскресенье является рабочим днем. Однако в рамках данной задачи эти условия не учитываются – будем исходить из стандартной схемы с выходными в субботу и воскресенье.

Время ожидания выходных и праздничных дней *i*-го судна по *j*-му рейсу определяется следующим образом:

$$T_1^{\square} = T_{ij}^{CLT}\text{, сут} \quad (37)$$

$$T_2^{\square} = t_{ij}^{\text{погр/выгр}} + T_{ij}^{CLT}\text{, сут} \quad (38)$$

$$t_{\square}^{\text{не раб.}} \text{ между } T_1^{\square} \text{ и } T_2^{\square}\text{,сут} \quad (39)$$

где $T_1^{\square}$ – первая переменная даты и времени;

$T_2^{\square}$ – вторая переменная даты и времени;

$t_{\square}^{\text{не раб.}}$ – нерабочее время между $T_1^{\square}$ и $T_2^{\square}$.

Если $t_{\square}^{\text{не раб.}} > 0$, то $T_1^{\square} = T_2^{\square}$; $T_2^{\square} = T_1^{\square} + t_{\square}^{\text{не раб.}}$, то возвращаемся к расчету по формуле 39.

Если $t_{\square}^{\text{не раб.}} = 0$, то $T_{ij}^{\text{заверш.погр/выгр}} = T_2^{\square}$

Для определения праздничных дней на практике чаще всего используют календарь BIMCO.

Ограничения. Для данной модели ограничениями являются:

Суда должны приходить раньше даты канцелинга

$$T_{ij}^{\text{под след рейс}} < T_j^{\text{Кан}} \quad \text{для всех i и j} \quad (40)$$

где $T_j^{\text{Кан}}$ – дата и время завершения подачи судна для заявки, сут

Судно, назначенное в заявке, можно заменить только на его субститут. Иными словами, проект судна, должен совпадать с проектом, указанным в рейсе.

$$P_i = R_j \quad \text{для всех i и j} \quad (41)$$

где R_j – проект судна для *j*-й заявки;

P_i – проект *i*-го судна.

Судно можно назначить только один раз:

$$\sum_i X_{ij} \leq 1 \text{ для всех } i \quad (42)$$

На рейс можно назначить только одно судно:

$$\sum_j X_{ij} \leq 1 \text{ для всех } j \quad (43)$$

Для всех рейсов с признаком «чистая сделка» должны быть выполнены:

$$\sum_j X_{ij} = 1 \text{ для всех } j \in J^{\text{clean}} \quad (44)$$

где J^{clean} – множество рейсов со статусом «чистая сделка».

Судно назначенное на рейс должно соответствовать санкционным ограничениям для каждого рейса

$$S_i^{OFAC} \leq S_j^{OFAC} \quad (45)$$

$$S_i^{EU} \leq S_j^{EU} \quad (46)$$

$$S_i^{UK} \leq S_j^{UK} \quad (47)$$

где $S_i^{OFAC/EU/UK}$ – наличие санкции OFAC/EU/UK *i*-го судна (либо 0, либо 1);

$S_i^{OFAC/EU/UK}$ – наличие санкции OFAC/EU/UK *j*-го рейса (либо 0, либо 1).

Заключение

Данная модель позволяет максимизировать прибыль за счет оптимизации расстановки флота и подбору наиболее выгодных сделок при условии, что имеющееся количество флота способно выполнить все «чистые сделки». В расчетах учитываются условия этих рейсов, такие как LC, режим работы портов в выходные и праздничные дни, условия начала сталийного времени, район работы. Еще одной отличительной особенностью является то, что в заявках рассматривается конкретный проект судна, что позволит в случае нехватки возможностей компьютера сократить задачу. Иными словами, обсчитывать не весь процесс целиком, а разбивать задачу на подзадачи и просчитывать только заявки по одному проекту. Помимо этого, в современных условиях приходится учитывать санкционные риски. Наличие соответствующих ограничений по странам, наложившим эти самые санкции, позволит более реалистично оценивать возможность выполнения конкретного рейса, конкретным судном.

На основе этих данных, а также данных о расстоянии между портами, была составлена таблица всевозможных расстановок флота с учетом проектов судов, которые необходимо предоставить для выполнения конкретных рейсов. Суда подобраны таким образом, чтобы расчетное время прибытия не превышало окончания согласованного с клиентом срока подачи судна. Также были учтены расходы на оплату сборов при прохождении Босфора, Дарданелл и Керченского проливов. В результате проведенных расчетов была получена расстановка флота, при которой средний TCE составляет 5 165 USD/судо-сутки, суммарный рейсовый результат составляет 2,2 млн USD. При этом следующие рейсы определены для 21 судна, из которых: 16 – это те, которые компания обязалась выполнить, 5 – находящиеся на стадии переговоров с фрахтователями и рекомендуемые к заключению. В случае появления новых заявок/CP задачу можно повторно перерешать.

Стоит отметить, что при решении данной задачи мы сталкиваемся с тем, что для ее решения необходимо знать ставку фрахта, которая является коммерческой тайной, и компании ее не раскрывают. Также в данной задаче не получится сравнить эффект от расстановки, поскольку, помимо уже известных рейсов (статистических данных), необходимо обсчитывать возможные рейсы, информация о которых хранится далеко не у всех судоходных компаний. Для того чтобы показать эффект от расстановки на

основе имеющихся данных, без использования ставки фрахта, данная задача реализовывалась по критерию минимизации расходов. Суммарные расходы от такого варианта составляют 1 301 309,01 USD. Суммарные расходы при исходной расстановке, которая была использована в пароходстве, составили 1 391 252,47 USD. Экономия составляет 89 943,46 USD или 6,46 %.

Однако стоит отметить, что в дальнейшем при решении данной задачи может быть рассмотрен ряд дополнительных факторов. К примеру, если судно приходит в порт раньше назначенной даты, то ему необходимо давать рекомендации по оптимальной скорости движения для экономии топлива. Оптимизация бункеровки судна с учетом места и стоимости топлива. При прогнозировании рейса необходимо добавить учет особенностей текущего и планируемого груза, а также особенностей конкретного судна. Например, затрачиваемое время на подготовку трюмов к погрузке, хватит ли времени на подготовку на переход в порт погрузки – в случае нехватки необходимо запрашивать дополнительное; техническое состояние судна, ограничения по району плавания, оплата сюрвейеров, наличие СОЛПа у капитана конкретного судна и т. д. В связи с этим данная модель будет совершенствоваться и дорабатываться.

Список литературы

1. Планирование деятельности предприятия: официальный сайт. – URL: https://scienceforum.ru/2014/article/2014004023 (дата обращения 24.10.2025).
2. БДР и БДДС: что это, отличия и как составить в 1С: официальный сайт. – URL: https://www.1ab.ru/blog/detail/bdds-i-bdr-v-1s-erp-i-upravlenie-holdingom (дата обращения 24.10.2025).
3. Месячное планирование: официальный сайт. – URL: https://dic.academic.ru/dic.nsf/railway/1499/МЕСЯЧНОЕ (дата обращения 02.11.2025).
4. Платов, Ю.И. Оперативное управление работой флота: конспект лекций для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 38.03.02-62 (080200.62) «Менеджмент», 23.03.01-62 (190700.62) «Технологии транспортных процессов», 26.03.01-62 (180500.62) «Управление водным транспортом и гидрографическое обеспечение судоходства» / Ю. И. Платов, М. В. Никулина, А. Ю. Платов. – Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2016. – 63 с.
5. Платов, А. Ю. Методология оперативного планирования работы речного грузового флота в современных условиях: диссерт. докт. техн. наук: 05.22.19./ А. Ю. Платов – Н. Новгород, 2010. – 365 с.
6. Ширяев, Е. В. Исследование методических вопросов оперативного планирования работы речного флота для автоматизации управления транспортным процессом / Горьк. ин-т инженеров водного транспорта, 1967. – 19 с.
7. Захаров В.Н. Организация работы речного флота: учеб. для ин-тов вод. трансп. / В. Н. Захаров, В. П. Зачесов, А. Г. Малышкин. – Мск: Транспорт, 1994. – 286 с.
8. Платов, Ю.И. Оперативное управление работой речного нефтеналивного флота: автореф. дис. докт. техн. наук: 05.22.19./ Ю.И. Платов. – Н. Новгород, 1998. – 48 с.
9. Платов, А.Ю. Методология оперативного планирования работы речного грузового флота в современных условиях: автореф. дис. докт. техн. наук: 05.22.19./ А. Ю. Платов. – Н. Новгород, 2011. – 46 с.
10. Корьев, В.Ю. Непрерывное регулирование работы танкеров смешанного река-море плавания: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.19./ В.Ю. Корьев. – Н. Новгород, 2017. – 24 с.
11. Синицына, И. А., Экономико-математическая модель оперативного планирования работы флота / И. А. Синицына, Ю. Н. Уртминцев // Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек: Труды межд. научно-промышленного форума – Н. Новгород, 2016. 68 –76 с.

References

1. Planning of the enterprise's activities: official website. – URL: https://scienceforum.ru/2014/article/2014004023 (date of access 10/24/2025)/
2. BDR and BDDKS: what they are, differences, and how to create them in 1C: official website. – URL: https://www.1ab.ru/blog/detail/bdds-i-bdr-v-1s-erp-i-upravlenie-holdingom (date of access 10/24/2025).
3. Monthly planning: official website. – URL: https://dic.academic.ru/dic.nsf/railway/1499/МЕСЯЧНОЕ (date of access 11/02/2025).
4. Platov, Yu.I. Operational management of fleet operations: lecture notes for students specializing in 38.03.02-62 (080200.62) «Management», 23.03.01-62 (190700.62) «Transport process technologies», 26.03.01-62 (180500.62) «Management of water transport and hydrographic support of navigation» / Yu. I. Platov, M. V. Nikulina, A. Yu. Platov. – Nizhny Novgorod: Publishing House of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «VSTU», 2016. – 63 pages.
5. Platov, A. Yu. Methodology for operational planning of river freight fleet work in modern conditions: doctoral dissertation in technical sciences: 05.22.19. / A. Yu. Platov – Nizhny Novgorod, 2010. – 365 pages.
6. Shiryayev, E. V. Research on methodological issues of operational planning of river fleet work for automation of transport process management / Gorky Institute of Water Transport Engineers, 1967. – 19 pages.
7. Zakharov, V. N., Zachesov, V. P., Malishkin, A. G. Organization of river fleet operations: textbook for water transport institutes / V. N. Zakharov, V. P. Zachesov, A. G. Malishkin. – Moscow: Transport, 1994. – 286 pages.
8. Platov, Yu. I. Operational management of river oil-tanker fleet: abstract of the doctoral dissertation in technical sciences: 05.22.19. / Yu. I. Platov. – Nizhny Novgorod, 1998. – 48 pages.
9. Platov, A. Yu. Methodology for operational planning of river freight fleet work in modern conditions: abstract of the doctoral dissertation in technical sciences: 05.22.19. / A. Yu. Platov. – Nizhny Novgorod, 2011. – 46 pages.
10. Koryev, V. Yu. Continuous regulation of tanker operations in mixed river-sea navigation: abstract of candidate of technical sciences dissertation: 05.22.19. / V. Yu. Koryev. – Nizhny Novgorod, 2017. – 24 pages.
11. Sinitsyna, I. A. Economic-mathematical model of fleet operational planning / I. A. Sinitsyna, Yu. N. Urtmincev // Problems of utilization and innovative development of internal waterways in the basins of great rivers: Proceedings of the international scientific and industrial forum – Nizhny Novgorod, 2016. pp. 68–76.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Фирсов Виктор Витальевич, аспирант кафедра Управления транспортом, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: Victorvfirsov@yandex.ru

Viktor V. Firsov, graduate student, Transport Management Department, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Уртминцев Юрий Николаевич, д.т.н., профессор, кафедра управления транспортом, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: yurtm@yandex.ru

Yuriy N. Urtmintsev, Doctor of Engineering Science, Professor of the Transport Management Department, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 22.01.2026; принята к публикации 10.08.2026; опубликована онлайн 20.09.2026. Received 22.01.2026; published online 20.09.2026.



Направление деятельности: Подъемно-транспортные машины и машиноремонт

КОЛЕБАНИЯ И ВИБРАЦИЯ

- Расчет крутильных колебаний валопроводов;
- Торсиографирование движительных установок судов;
- Измерение вибрации на судах.

ЗАЩИТА И ВОССТАНОВЛЕНИЕ

- Разработка пылеудаляющих устройств при перегрузке навалочных грузов;
- Упрочнение деталей наплавкой;
- Восстановление деталей наплавкой

ГРУЗОПОДЪЕМНЫЕ МАШИНЫ

ДЕФЕКТАЦИЯ

Дефектация элементов металлоконструкций грузоподъемных машин, устройств методами неразрушающего контроля и безразборной диагностики;

ПРОЕКТНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ

Разработка проектно-конструкторской документации на изготовление, реконструкцию, ремонт и модернизацию подъемных сооружений и технологического оборудования подъемных сооружений;

ЭЛЕМЕНТЫ ЗДАНИЙ

Разработка проектной документации на элементы зданий и сооружений с крановыми нагрузками.

> Инфраструктура водных путей, грузовой и пассажирский флот, судостроение, судоремонт не могут существовать без погрузо-разгрузочных работ, основой которых являются подъемно-транспортное оборудование

www.vsuwt.ru

Россия, Н.Новгород, ул. Нестерова 5

Подъем и Утилизация судов

В рамках Научно-исследовательского проекта по созданию Информационно-технологической платформы "Подъем и утилизация судов" для плавсредств внутреннего и смешанного (река-море) плавания

ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ СУДНА

Практическая значимость проекта «ПИУС»:

В ходе проекта планируется создать информационно-технологическую платформу «Подъём и утилизация судов», структура которой представляет собой ряд взаимно интегрированных баз данных, например:

- по судам внутреннего и смешанного (река-море) плавания, подлежащим утилизации с учетом вида флота;
- по компонентному составу судов, подлежащих утилизации;
- по размерам вреда от судов, подлежащих утилизации;
- по существующим и перспективным технологиям в области судоподъема судов и их разделки на лом;
- по расположению и производственным мощностям предприятий, задействованных при подъеме и утилизации судов и др.;
- по нормативной базе и др.



Локальный пример. Разработка ПО. Макроанализ.

При оценке жизненного цикла судна обоснованно учитывать процесс вывода из эксплуатации, включая прямые и распределяемые расходы на утилизацию. В случае подъема затонувших/полузатонувших судов учитываются риски, которые влияют на экологический ущерб водным ресурсам.





Цель проекта:
Разработать информационно-технологическую платформу «Подъем и утилизация судов» для плавсредств внутреннего и смешанного (река-море) плавания, которая обеспечит возможность судовладельцам, контрольно-надзорным органам и отходоперерабатывающим компаниям, организациям, занимающимся подъёмом и разделкой судов, при планировании и производстве работ по подъёму и обезвреживанию судов, подлежащих утилизации применять научно-обоснованные методики оценки опасности и технологии подъёма, транспортировки на судоразделочную площадку разделки, утилизации и обезвреживания, использовать эти методики и технологии в создании и развитии АСУ предприятий водного транспорта, контрольно-надзорных органов и отходоперерабатывающих компаний.

Ожидаемая эффективность проекта:
Реализация результатов НИР будет способствовать:
- созданию условий для рационального природопользования;
- снижению нагрузки на окружающую среду объектов судостроительной отрасли;
- оптимизации негативного воздействия судостроительной отрасли;
- повышению уровня технологичности подъёма судов, их разделов и утилизации отходов.

Участники проекта: Управление научных исследований, Центр стратегического развития ВВП и инфраструктуры, каф. Охраны окружающей среды и производственной безопасности, каф. Проектирования и технологии постройки судов, каф. Водных путей и гидротехнических сооружений, КБ ВГУВТ, каф. Бухгалтерского учета, анализа и финансов

ВЫВОДЫ:

Суммарная оценочная масса брошенных судов составила: **101** Тыс. тонн

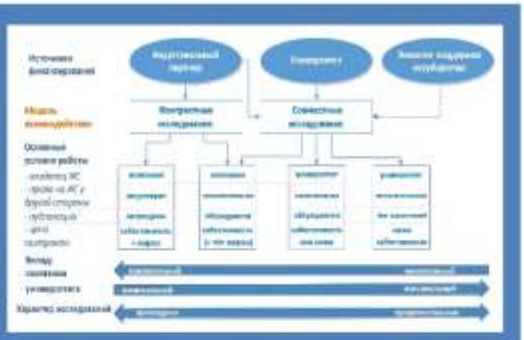
Размер вреда водным объектам превышает ориентировочно: **25** млрд. руб

Технико-экономическое обоснование строительства судов технического флота для содержания внутренних водных путей Российской Федерации

Взаимодействие университета с организациями отрасли

Университетом оформирована модель взаимодействия с организациями отрасли.

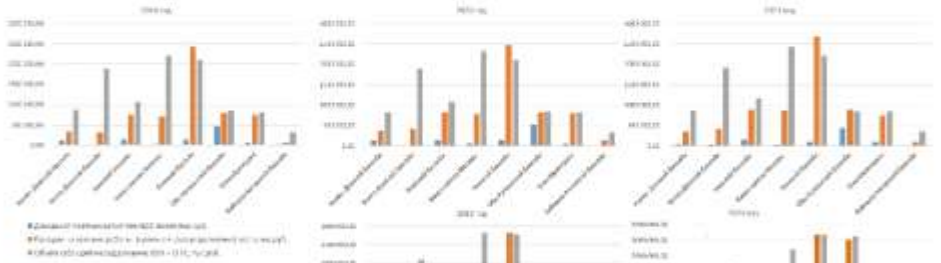
Задачи модели:
- Организация науковемких исследований с привлечением научных школ университета;
- Поддержка развития кадров на предприятиях и внедрение научного подхода



Цель: Формирование обоснованных прогнозов развития отраслевых предприятий, формирование для них устойчивых финансовых моделей с учетом специфики и динамики рынка.

Локальный пример Аналитической работы. Макроанализ

> При оценке эффективности выделяемых субсидий сопоставлялась их величина с расходами на путевые работы (прямые +распределяемые) плюс доходы от платных работ



Описание:
Кафедрой Бухучета был выполнен укрупненный анализ эффективности использования объема субсидий на содержание внутренних водных путей (ВВП) и судоходных гидротехнических сооружений (СГТС) по восьми Администрациям бассейнов за последние пять лет (2019-2023гг.)

Цель:
На основе проведенного анализа разработать методическую рекомендации для Администраций бассейнов внутренних водных путей

Участники проекта: Управление научных исследований, Центр стратегического развития ВВП и инфраструктуры, КБ ВГУВТ, каф. Проектирование и технология постройки судов, каф. Водные пути и гидротехнических сооружений, каф. Бухучета

ВЫВОДЫ

Из восьми, представленных в анализе Администраций бассейнов у половины (50%) объем выделяемых субсидий превышает расходы на путевые работы плюс доходы от платных работ. К ним относятся Азово-Донской бассейн, Волго-Донской бассейн, Канал имени Москвы, Байкало-Ангарский бассейн.

Больше аналитики по теме:
в рамках ГК -Технический флот по всем АБУ за период 2014-2024гг + прогнозы



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ТРЕНАЖЕРНЫЙ ЦЕНТР « М Е Х А Н И К »

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТДЕЛ



УЧЕБНО-ТРЕНАЖЕРНАЯ БАЗА / участок на АО «БОРРЕМФЛОТ» / СВАРОЧНЫЙ ПОЛИГОН



- - 25 лет в составе научного департамента ВГУВТ
- - Лидер по объему полученных средств за выполненные работы среди научных подразделений университета за время существования центра.
- Компетенции в области технологий ремонтной сварки, наплавки, напыления и дефектоскопии.
- Научно-технический отдел, учебно-тренажерная база, сварочный полигон.
- Обучение сварке, разработка технологических процессов ремонта поверхностей деталей, собственное ремонтное производство.

> На производстве, особенно сейчас, важную роль играют люди рабочих специальностей высокой квалификации. Работа центра «Механик» всецело отвечает задачам подготовки кадров. Отраслевая направленность и наличие реальных заказов, научный подход, позволяют лучше раскрывать профессию.

www.vsuwt.ru

Россия, Н.Новгород, ул. Б. Печерская 95

Работы КОНСТРУКТОРСКОГО БЮРО

В рамках Направлений:
ИНФРАСТРУКТУРА ВОДНОГО ТРАНСПОРТА и
ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАЛОМЕРНОГО ФЛОТА

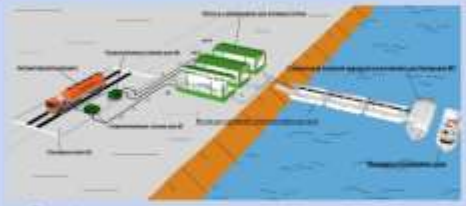
ПРЕДЛАГАЕМЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ БУНКЕРОВКИ МАЛОМЕРНЫХ СУДОВ ЖИДКИМ МОТОРНЫМ ТОПЛИВОМ

Малая топливораздаточная платформа



Особенность: резерв топлива находится на берегу. Размеры платформы в плане 10×5 метров

Большая топливораздаточная платформа



Данный вид станции одного типа с малой платформой, отличию заключается в габаритных размерах и типе устанавливаемой раздаточной колонки.

Бункеровочная станция

Стоечное судно. Подача топлива может осуществляться как с берега, так и наливом с танкера. В конструкции имеет танки для разных видов топлива: бензины АИ-92 и АИ-95, а также дизельное топливо.

На станции устанавливаются топливораздаточные колонки или насосная установка с автоматизированной дозой выдачи топлива. Возможно производить бункеровку на рейде.



Перечень регулирующих организаций для проектов по бункеровке судов на Внутренних водных путях (на Водных объектах вне ВВП процедура другая)

1. Российское классификационное общество; 2. Администрация внутренних водных путей; 3. Администрация района водных путей и судоходства; 4. Бассейновое водное управление Федерального агентства водных ресурсов; 5. Территориальное управление Росрыболовства; 6. Роспотребнадзор; 7. Комитет по имуществу и земельным отношениям; 8. Государственный морской и речной надзор

РАЗРАБОТКА ПРОЕКТОВ ХАУСБОТОВ

Проектирование для судоверфи:





Проектирование под самострой (частные заказчики)



Кемпер-боты



Конструкторское бюро разработало проектную документацию для плавучих домов (хаусботов) различных российских производителей, от эскизных проектов и построечной документации, до проектов под регистрацию судов индивидуальной постройки и серийного выпуска

Суммарное количество разработанных проектов маломерных судов **>200 проектов**

Руководитель КБ
Шабала Алексей Геннадьевич
+7 (987) 193-38-87
kb@vsuwt.ru / kbvsuwt.ru

КБ имени инженера-конструктора Е.В. Фальковича - подразделение Управления научной и инновационной деятельности ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

Научные проблемы
водного транспорта

Russian Journal of Water
Transport

№88(3), 2026

Формат бумаги 70х180 1/16. Бумага офсетная.
Ризография. Усл. печ. л. 15,63. Уч.-изд. л. 21,88.
Заказ. Тираж 500.

Федеральное агентство морского и речного транспорта.
Федеральное государственное бюджетное образовательно учреждения высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»)
Отпечатано ИП Волков Александр Евгеньевич. Адрес Воронежская область, г. Воронеж, ул. Московский проспект, д. 125, кв. 289.

Свободная цена

Подписной индекс в Объединенном каталоге "Пресса России"
70191

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)
Свидетельство ПИ № ФС77-77658 от 17 января 2020 г.

Адрес редакции и издателя:
603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, д.5

Управление научных исследований и инновационной деятельности
© ВГУВТ, 30.09.2026

Научные проблемы водного транспорта № 88 (3) 2026