



<http://journal.vsuwt.ru>
DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt>

ISSN 2713-1858 (print)
ISSN 2713-1866 (on-line)

Научные проблемы водного транспорта

№86 (1) 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 «Волжский 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 открытый 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;

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

Вычужанин Владимир Викторович, д.т.н., профессор, член-корреспондент Транспортной академии Украины, Одесский национальный морской университет, г. Одесса, Украина;

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

Гирич 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;

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

Минеев Валерий Иванович, д.э.н., профессор, Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, 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;

Сафаров Айрат Муратович, д.т.н., Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, 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.

© BГYBT, 2026



<http://journal.vsuwt.ru>
DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt>

ISSN 2713-1858 (print)
ISSN 2713-1866 (on-line)

Russian Journal of Water Transport

№86 (1) 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 *printed, 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 university of water transport, Nizhny Novgorod, Russia

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

Editor In chief deputy: Sergey G. Mitroshin, Cand. Sci. (Tech.), Volga state university of water transport, Nizhny Novgorod, Russia

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

Executive Secretary: Olga A. Raeva, Volga state university 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 university of water transport, Nizhny Novgorod, Russia;

Yuriy I. Bik, Dr. Sci. (Tech.), professor, 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;

Vladimir V. Vichyuzhanin, Dr. Sci. (Tech.), professor, corresponding member of Academy of transport of the Ukraine, Odessa National maritime university, Odessa, Ukraine;

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 university 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 university of water transport, Nizhny Novgorod, Russia;

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

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 university of water transport, Nizhny Novgorod, Russia;

Yuri A. Kochnev, Dr. Sci. (Tech.), assistant professor, Volga state university 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 university 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;

Valeriy I. Mineev, Dr. Sci. (Econ.), professor, Volga state unuversity of water transport, Nizhny Novgorod, 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;

Airat M. Safarov, Dr. Sci. (Tech.), Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, 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.

СОДЕРЖАНИЕ

Судостроение, судоремонт и экологическая безопасность судна

П. А. Бимберков

Перспективы роботизации процесса при модернизации барж-площадок проекта Р-56 для повышения разряда плавания (класса) РКО 13

Н.Е. Румянцев, В.П. Морозов, Е.С. Шишов, Н.С. Гладышев

Продувка крыла профиля Clark YH 8% вблизи поверхности экрана..... 22

А.Ю. Рыченкова

Оптимизация конструкции выносной рамы спускоподъемного устройства для телеуправляемого подводного аппарата..... 36

С.В. Терлыч

Учёт требований виброакустики при проектировании судовых механических установок 47

А.В. Февральских, Е.М. Грамузов, Ю.А. Карников

Проблемы классификации скоростных амфибийных судов комбинированного типа 57

Е.Ю. Чебан, Д.В. Никущенко, А.А. Мольков

Исследование гидродинамики маломерного судна с тоннельной кормой численными методами..... 71

Судовое энергетическое оборудование

А.Н. Бердник

Концептуальные модели идентификации параметров турбины турбокомпрессора судового дизеля..... 83

С.Н. Валиулин, М.Ю. Храмов

Расчет и проектирование судовых бокскулеров 94

А.А. Панасенко, С.В. Петрашёв

Влияние настроечных параметров регулятора частоты вращения на переходный процесс..... 103

В.А. Чернов, О.П. Шураев, А.Г. Чичурин

Определение предельного содержания нефтепродуктов при термическом обезвреживании нефтесодержащих вод в газоходе, моделирующем газовыпускной трубопровод судового дизеля 116

Экономика, логистика и менеджмент на транспорте

Д.В. Дрейбанд

Создание особых экономических условий для развития речной терминальной инфраструктуры..... 128

В. Н. Костров, Н.А. Баринава, Д.Н. Сухарев

Научно-методический подход к управлению цифровой трансформацией складской логистики..... 140

В.В. Цверов, С.Г. Цуркан, И.С. Соловьева, В.И. Минеев Исследование цепей поставок нерудных строительных материалов, добываемых предприятиями речного транспорта	154
В.С. Чеботарев, О.Л. Морозов, А.В. Дорожкин, В.И. Минеев Актуальные задачи обеспечения экономической безопасности региональной транспортной инфраструктуры	166

Эксплуатация водного транспорта, водные пути, сообщения и гидрография

А.Е. Асташин, О.Е. Ватина, И.С. Гусев, М.В. Никонов Геоэкологический анализ территории водосборного бассейна реки Кетарша на основе ландшафтного подхода.....	175
Н.А. Волкова Стратегические направления развития гидрологического прогнозирования для обеспечения безопасности и эффективности судоходства в России до 2035 года	185
С.С. Герасимов, А.Н. Ситнов Оценка влияния работы гребных винтов и габаритов судоходного канала на размыв дна по результатам математического моделирования гидравлики потока.....	201
В.А. Лобанов, В.И. Тихонов Ледовый паспорт речного ледокола: оптимизация проекта	209
К.Г. Тюленев, А.О. Ничипорук Анализ основополагающих трудов и перспективных направлений исследований в сфере линейного судоходства.....	217
И.К. Фомина, Е.А. Смирнов Технология контроля ледового покрова на основе семантической сегментации облака точек.....	226

CONTENTS

Shipbuilding, ship repair and ecological safety of the ship

Pavel A. Bimberekov

Prospects for robotization of the process during the modernization of barge platforms of the R-56 project to increase the RCS sailing category (class) 13

Nikita E. Rumyantsev, Viktor P. Morozov, Egor S. Shishov, Nikita S. Gladyshev

Wind tunnel testing of the Clark YH 8% profile wing near the ground surface 22

Anna Yu. Rychenkova

Optimization of the outrigger frame design of the descent device for a remote-controlled underwater vehicle 36

Stanislav V. Terlych

Consideration of vibroacoustic requirements in the design of marine mechanical installations 47

Andrey V. Fevral'skikh, Eugeny M. Gramuzov, Yuriy A. Karpikov

Classification of high-speed amphibious vessels of mixed type 57

Egor Yu. Cheban, Dmitry V. Nikushchenko, Alexandr A. Mol'kov

CFD study on hydrodynamic of a boat with a tunnel stern 71

Ship power equipment

Aleksey N. Berdnik

Conceptual models of identification the parameters turbine of turbocharger of marine diesel engine 83

Sergey N. Valiulin, Michael Y. Khramov

Calculation and design of marine box coolers 94

Andrey A. Panasen'ko, Sergey V. Petrashev

The influence of speed controller settings on the transitional process 103

Vladimir A. Chernov, Oleg P. Shurayev, Alexander G. Chichurin

Determination of the limiting petroleum product content during the thermal treatment of oil-containing wastewater in a gas duct simulating the exhaust pipeline of a marine diesel engine 116

Economics, logistics and transport management

Dmitry V. Dreiband

Creation of special economic conditions for the development of river transportation 128

Vladimir N. Kostrov, Natalya A. Barinova, Dmitry N. Sukharev

Scientific and methodological approach to managing the digital transformation of warehouse logistics 140

Vladimir V. Tsverov, Sergey G. Tsurkan, Irina S. Solovyova, Valery I. Mineev

Supply chain research non-metallic building materials, produced by river transport enterprises 154

Vladislav S. Chebotarev, Oleg L. Morozov, A.V. Dorozhkin, Valery I. Mineev

Current issues in ensuring the economic security 166

Water transport operation, waterways communications and hydrography

Andrej E. Astashin, Ol'ga E. Vatina, Ivan S. Gusev, Matvey V. Nikonov

Geoecological analysis of the Ketarsha river catchment basin based
on a landscape approach 175

Nadezhda A. Volkova

Strategic development trends in hydrological forecasting to ensure navigation
safety and efficiency in Russia until 2035 185

Sergey S. Gerasimov, Aleksandr N. Sitnov

Assessing the impact of propeller operation and the dimensions of the shipping
channel on bottom erosion based on the results of mathematical modeling
of flow hydraulics 201

Vasily A. Lobanov, Vadim I. Tikhonov

Ice passport of a river icebreaker: project optimization 209

Kirill G. Tulenev, Andrei O. Nichiporuk

Analysis of fundamental investigation and prospective research areas
in liner shipping 217

Inga K. Fomina, Egor A. Smirnov

Technology for ice cover control based on semantic segmentation of a point cloud 226

СУДОСТРОЕНИЕ, СУДОРЕМОНТ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СУДНА

SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND ECOLOGICAL SAFETY OF THE SHIP

УДК 629.12

DOI: 10.37890/jwt.vi86.675

Перспективы роботизации процесса при модернизации барж- площадок проекта Р-56 для повышения разряда плавания (класса) РКО

П. А. Бимберков

ORCID: 0000-0003-4303-8570

*Сибирский государственный университет водного транспорта, г. Новосибирск,
Россия*

Аннотация. При модернизации судов с повышением их разряда плавания необходимо обеспечить требования к их корпусным конструкциям на уровне действующих норм на момент разработки проекта модернизации. Целесообразность проектирования и проведения модернизационных работ, а не проектирование и строительство нового судна обусловлена снижением: уровня и объемов проектных работ; требований к уровню производства (материальной базы и кадрового состава); заменяемых и вводимых дополнительно объемов металлопроката. Для сохранения возможности вести погрузочно-разгрузочные работы грейфером согласно действующих норм толщина стенок рамных балок подпалубного набора и примыкающих к палубе поясьев переборок должна быть существенно выше, чем остаточная толщина этих конструкций у модернизируемых барж-площадок проекта Р-56. Их полная замена по принятым технологиям была оценена как нецелесообразная, практически приводящая к отказу от модернизации накопившего остаточные деформации палубного перекрытия. Для модернизации указанных связей палубного перекрытия и переборок в ходе производимого под руководством автора проекта СКС 013.Р-56 в ООО «Судоходная компания «Север» (СК «Север») был произведен комплекс работ по обоснованию установки на них подкрепляющих элементов в виде накладных пластин. Российский Речной Регистр (ныне Российское Классификационное Общество) приняли предложенное обоснование применимости такого технического решения и утвердили проект модернизации. Позже на данное нестандартное техническое решение был получен патент на изобретение №2448861.

Очевидная цель технического решения – минимизация затрат металлопроката и трудозатрат при модернизации палубного перекрытия барж-площадок проекта Р-56, возможность ведения работ силами самой СК «Север». Обсуждается возможная роботизация данного процесса модернизации и возможность подетальной замены стенок подпалубных рамных балок и поясьев переборок при наличии роботизированного комплекса.

Ключевые слова: конструкция палубного перекрытия, повышение разряда плавания, модернизация палубного перекрытия, технология, роботизация процесса модернизации.

Prospects for robotization of the process during the modernization of barge platforms of the R-56 project to increase the RCS sailing category (class)

Pavel A. Bimberekov

Siberian State University of Water Transport, Russian Federation

Abstract When upgrading vessels to upgrade their operational class, it is necessary to ensure that their hull structure requirements meet current standards at the time the modernization project is developed. The feasibility of designing and implementing modernization work, rather than designing and building a new vessel, is determined by the following: the level and scope of design work; production requirements (material resources and personnel); and the volume of rolled metal products to be replaced and introduced. To maintain the ability to perform loading and unloading operations using a grab in accordance with current standards, the wall thickness of the below-deck frame girders and the bulkhead chords adjacent to the deck must be significantly greater than the residual thickness of these structures on the Project R-56 platform barges being modernized. Their complete replacement using accepted technologies was deemed impractical, practically resulting in the abandonment of the modernization of the deck flooring, which has accumulated residual deformations. To modernize the aforementioned deck and bulkhead connections, a series of works were carried out at SKS 013.R-56 Shipping Company LLC (SK Sever) under the supervision of the author of the project to justify the installation of reinforcing elements in the form of overlay plates. The Russian River Register (now the Russian Classification Society) accepted the proposed justification for the applicability of this technical solution and approved the modernization project. Patent No. 2448861 was later issued for this unconventional technical solution.

The obvious goal of the technical solution is to minimize metal and labor costs during the modernization of the deck floors of Project R-56 barges, allowing the work to be carried out by SK Sever itself. Potential robotization of this modernization process and the possibility of replacing the underdeck frame beams and bulkhead chords piece by piece with a robotic system are being discussed.

Keywords: Deck design, increasing the class, deck modernization, technology, robotization of the modernization process.

Введение

На момент принятия решения о модернизации барж-площадок проекта Р-56 их срок эксплуатации превысил тридцать лет. Задачей проектных работ было получить для модернизируемых судов класс «М3,0» Российского Речного Регистра (РРР) [1] (в настоящее время Российского Классификационного Общества (РКО) [2]) при исходном «Р1,2». Отдельные позиции произведённой модернизации по проекту СКС 013.Р-56, разработанном под руководством автора в ООО «Судоходная компания «Север» (СК «Север») были освещены в работах [3...8]. Дадим в табл.1 основные характеристики судов до и после модернизации.

Таблица 1

Основные характеристики судов до и после модернизации

Параметр	Ед. изм.	Номер проекта	
		Р-56	СКС 013.Р-56
Класс РРР (РКО)	-	«Р1,2»	«М3,0»
Длина габаритная	м	86,0	86,0
Длина расчётная	м	83,51	80,4
Ширина расчётная	м	16,5	16,5
Высота борта	м	2,85	2,85
Осадка в полном грузу	м	2,63	2,04
Осадка порожнём	м	0,400	0,483

Параметр	Ед.	Номер проекта	
Водоизмещение в полном грузу	т	3244,3	2460
Водоизмещение порожнём	т	414,3	502,7
Грузоподъёмность	т	2830	1957

В результате дефектации модернизируемых судов по палубному перекрытию, получены следующие значения остаточных толщин табл.2. Дополнительно в таблице даны принятые для расчета значения остаточных толщин связей.

Таблица 2

Остаточные толшины связей палубного перекрытия модернизируемых судов

№	Наименование связи	Средняя остаточная толщина связи корпуса судна, мм					
		Проект-ная	СКС-3000	СКС-3001	СКС-3002	СКС-3003	принятая в расчет
1	Настил палубы	10	9,7...9,8	9,7...9,8	9,1...9,6	9,5...9,7	9,1
2	Стенка балок рамного набора палубы	5	4,9	4,8...4,9	4,8...5,0	4,9...5,0	4,8
3	Полка рамных бимсов	6	-	-	-	-	5,8
4	Полка рамных карлингсов	8	-	-	-	-	7,8
5	Поперечные переборки	5	4,8	4,8	4,7...4,8	4,6...4,8	4,6
6	Продольные переборки	5	4,9	4,9	4,7...4,8	4,7...4,8	4,7
7		8	7,8	7,8	7,7...7,8	7,8...7,9	7,7
8	Ребро жесткости палубы	7	6,8	6,8	-	-	6,8

В проектный расчёт были взяты с ошибкой в безопасную сторону минимальные значения остаточных толщин (табл.2). Толщина стенок рамных подпалубных балок и верхних поясов переборок не соответствовали требованиям РРР для случая ведения погрузочно-разгрузочных работ грейфером.

В табл.3 дадим значения пролётов балок у палубного перекрытия проекта №Р-56 и сопоставление их с требуемыми по Правилам РРР (РКО).

Таблица 3

Сопоставление пролетов балок проекта №Р-56 с требуемыми по действующим Правилам РРР (РКО)

№	Наименование пролета	Значение, мм		Примечание
		по [1], мм	По проекту №Р-56	
1	Расстояние между продольными подпалубными ребрами жесткости	400...650	660	Шпация отличалась от действующих Правил РРР на момент проектирования, принята РРР
2	Расстояние между карлингсами	2500	3300; 2640	Отличалась от действующих Правил РРР на момент проектирования, принята РРР
3	Расстояние между бимсами	1800	1200	Удовлетворяет современным требованиям
4	Шпация в носовой оконечности	550	600	Не удовлетворяет современным требованиям
5	Шпация форпика	550	400	Удовлетворяет современным требованиям
6	Шпация в кормовой	550	660	Не удовлетворяет

№	Наименование пролета	Значение, мм		Примечание
	оконечности			современным требованиям и по размеру и т.к. система набора продольная
7	Шпация ахтерпика	550	400	Удовлетворяет современным требованиям

На основании рассмотрения данных табл. 3 были сделаны следующие заключения:

- позиция 1 определялась в базовом проекте для расчетной нагрузки, была обоснована и практически проверена допустимость отклонения от норм РРР при полной загрузке до 2830 т, показала свою работоспособность. Допустимость её сохранения при учёте понижения загрузки подтверждена в проекте модернизации расчётом;

- позиция 2 базового проекта определялась для расчетной нагрузки, была обоснована и практически проверена допустимость отклонения от норм РРР при полной загрузке до 2830 т: пролет величиной 2640 мм близок нормативному, его было решено сохранить; пролет в 3300 мм принято разделить на два посредством установки карлингсов на расстоянии 1650 мм от диаметральной плоскости;

- позиции 4,6 изменять нецелесообразно;

- позиции 3,5,7 соответствовали действующим нормам РРР.

Для введения стенок рамных подпалубных балок и верхних поясков переборок в соответствие требованиям РРР в сложившейся практике обычно предпринималась полная замена связей палубного перекрытия (см. например [9]), что предполагало и удаление самой усиленной из связей корпуса – палубного настила. В качестве альтернативного решения автором было предложена установка в плоскости стенок балок и верхних поясов переборок накладных листовых элементов. Их крепление предполагалось электросваркой по периметру и в плоскости стенки электрозаклёпками. Был произведён сравнительный эксперимент, подробно описанный в [5], показавший работоспособность получаемых конструкций, в том числе и возможность контроля остаточных толщин подкреплённой стенки и подкрепляющего накладного элемента. Представленные в РРР результаты эксперимента убедили в допустимости такого решения и проект модернизации СКС013.Р-56 был утверждён и реализован СКС «Север». Позднее с согласия компании автор получил на данное техническое решение патент на изобретение [10].

На рис.1 представлено промежуточное состояние подкрепления оговоренных конструкций палубы накладными листовыми элементами. Кроме того здесь виден дополнительный карлингс, установленный на расстоянии 1650 мм от диаметральной плоскости.

Цель работы: рассмотрение на конкретном частном примере случая модернизационных работ при формировании палубного перекрытия включающего монтаж дополнительных конструкций баржи-площадки проекта Р-56 с повышением класса до «*М3,0» и обсуждение данного вида работ при возможной роботизации процесса.



Рис. 1 Фотоизображение реализации подкрепления стенок рамных балок и верхних поясьев переборок листовыми накладными элементами по проекту СКС13.Р-56

Технология монтажа и установки дополнительных связей палубного перекрытия

Накладные листовые элементы были заранее нарублены в размер на гильотине и в них выколоты отверстия под электрозаклёпки. Накладные элементы подавались вручную, устанавливались у балок на полки и при необходимости подгонялись по месту при наличии незначительных вмятинок. Размер большинства из последних, как правило, не требовал учёта при дефектации. Далее накладные элементы фиксировались прихватками и проваривались. На переборках полки отсутствуют и для удобства монтажа иногда использовались временные опорные элементы. Принципиально при наличии небольших кромочных деформаций или выпучин стенок подпалубных балок накладные листовые элементы возможно устанавливать с любой стороны стенки. При наличии значимых, мешающих установке накладных листовых элементов деформаций стенок рамного попалубного набора и переборок предварительно возможно проведение работ по их правке до приемлемой величины, используя принципиальные технологии, изложенные, например в [11-14]. Отметим, что пригоночные работы на высоте в верхнем положении в практически закрытом пространстве, не самые комфортные и работники по возможности пытаются от них «откреститься».

Обсуждение возможности роботизации рассматриваемого процесса модернизации палубного перекрытия

Примем следующий ряд допущений возможности ведения процессов роботизированным комплексом или несколькими отдельными роботами:

- 1) сканировать пространство отсека, при этом точно позиционируя перемещение сканирующего устройства по специально устанавливаемым направляющим или существующим балкам судового набора;
- 2) перемещать по заданной на основе картины сканирования траектории рабочий орган и с заданными параметрами движения как на холостом ходу (без осуществления процесса, например, сварки, резки, нагрева и т.п.) так и в рабочем режиме с возможностью корректировки человеком-оператором;
- 3) извлекать с места расположения удаляемые элементы связей и устанавливать их заменяющие для фиксации и сварки в запланированном месте;
- 4) производить финальную обработку сварочных швов (очистку от шлака, контроль, возможно окраску) и т.п.

Качественно оценим применение роботизации при реализации процесса модернизации палубного перекрытия согласно проекту СКС 013.Р-56 и для случая или полной замены подпалубных балок или только их стенок, а также примыкающих к палубе поясьев переборок. По нашему мнению, реализацию оговоренных процессов модернизации можно представить в следующем порядке.

При реализации по проекту СКС 013.Р-56

1. Произвести процесс лазерного сканирования или фотограмметрическим методом в отсеках с базированием или на специально установленные направляющие, либо на существующий набор. Возможно и сканирование при помощи дрона, в частности и при его произвольном движении по отсеку, что также должно привести за счёт большого объёма взаимоувязанной информации к точному формированию 3-D моделей отсеков, отведённых для модернизационных работ.

2. После размещения в отсеках роботизированного комплекса производство монтажа и жёсткой фиксации заранее заготовленных накладных листовых элементов на основе 3-D моделей отсеков. Предполагается, что в результате предварительной обработки 3-D моделей отсеков будут заложены режимы и траектории для производства сварочных работ. Вполне очевидно, что действия робота могут быть проверены на холостом ходу и при необходимости быть внесены необходимые корректировки. Отметим возможность предварительной правки конструкций при возникновении такой необходимости и соответственной корректировки 3-D моделей отсеков.

Наблюдение за процессом ведения сварочных работ возможно и дистанционно (например, из соседнего отсека), или в присутствии человека-оператора в самом отсеке, но не непосредственно в зоне выполнения огневых работ.

3. Оговоренная выше финальная обработка сварных швов.

Работы, ввиду отсутствия удаляемых связей и соответственно без ослабления корпуса могут вестись широким фронтом, сразу в нескольких сечениях корпуса.

При реализации полной замены подпалубных балок или стенок балок и примыкающих к палубе поясьев переборок

Данный пункт полностью повторяет аналогичный пункт предыдущей реализации. Временное исключение работы связей из конструкций корпуса судна в ходе демонтаж-монтажных работ должно быть по возможности минимальным, не приводящим к существенным дополнительным общим и местным деформациям корпуса. Поэтому работа по вырезке, извлечению и монтажу и жёсткой фиксации заменяемых конструкций должны вестись узким фронтом.

После вырезки заменяемых конструкций (балок или стенок балок и верхних поясьев переборок), которые имели деформацию, настил в зоне их крепления уменьшит стрелку прогиба, что потребует дополнительного уточнения 3-D модели в данной зоне.

Данный пункт повторяет пункт 2 предыдущей реализации, однако, с учётом того, что работа должна вестись узким фронтом и пункты 3 и 4 данной реализации будут множественно последовательно повторяться.

Финальная обработка сварных швов (может быть заложена и в ходе ведения работ узким фронтом по пункту 4 данной реализации).

Следует заметить, что использование роботизированного комплекса при обеих реализациях предполагает удаление человека из зоны огневых работ, уменьшение трудоёмкости монтажа подкрепляющих и заменяемых связей палубного перекрытия.

Заключение

В статье приведён частный случай модернизационных работ палубного перекрытия барж-площадок проекта Р-56, согласно проекту СКС 013.Р-56, реализация которых на практике дала положительный результат. Для пояснения потребности таких работ приведены данные оценок технического состояния палубных перекрытий корпусов барж-площадок и оценки соответствия требованиям Российского Классификационного Общества (на момент модернизации Российского Речного Регистра). Обсуждены возможности применения роботизации процессов при производстве конкретных модернизационных работ по проекту СКС 013.Р-56 и при полной или частичной замене стенок подпалубных балок и верхних поясьев переборок. На основании обсуждения обеих реализаций, на наш взгляд, можно заключить, что вероятней всего и при использовании роботизированных комплексов реализация с накладными элементами будет предпочтительней. В тоже время следует учесть, что при выдерживании одинаковой контактной нагрузки пакет из стенки балки и накладного листового элемента будет тяжелее, по сравнению с целостной стенкой [5]. При этом, правда, поперечное сечение накладных элементов карлингсов войдут всей площадью в эквивалентный брус корпуса судна, что увеличит его прочность. Выбор же конкретной реализации из выше рассмотренных реально может зависеть от множества факторов, наличия металлопроката, рабочей силы, иногда необходимость поддержания в тонусе работников предприятия и т.д., возможности иметь или арендовать роботизированные комплексы и т.п. Могут быть применены и нестандартные решения, в частности, кантование барж в положение палубой вниз. Рациональный выбор сценариев реализаций отдельная непростая задача, которая может решаться при специальном построении оценочных аппаратов, например с использованием функции желательности Харрингтона (см. для примера [15...21]). В любом случае применение роботизированных комплексов улучшает условия работы персонала предприятия в ходе ведения модернизации корпусов судов.

Список литературы

1. Российский Речной Регистр. Правила. В 4 т. Т.2. - М.: Новости, 2009. 406 с.
2. ФАУ «Российское Классификационное Общество». Правила классификации и постройки судов. URL: <https://rfclass.ru/izdaniya-rko/pravila-klassifikatsii-postroyki-i-osvidetelstvovaniya-sudov-vvp-sudov-smeshannogo-reka-more-plavaniya-plavuchikh-obektov/pravila-klassifikatsii-i-postroyki-sudov/> (дата обращения 28.08.2025).
3. Бимбереков П.А. Укрупненная оценка мероприятий модернизации корпуса баржи-площадки проекта Р-56 для повышения класса с «*Р1,2» до «*М3,0». Материалы Международной юбилейной научно-технической конференции «Обновление флота – актуальная проблема водного транспорта на современном этапе». Ч.1. – Новосибирск: ФГОУ ВПО НГАВТ, 2011, с.113-117.
4. Бимбереков П.А. Опыт модернизации барж-площадок проекта №Р-56 с повышением класса до «*М3,0». Материалы международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы инновационного развития водного транспорта». – Новосибирск: ФГОУ ВПО НГАВТ, 2013, с.197-198.
5. Бимбереков П.А., Фомин А.В., Сащиков Н.А. Экспериментальное обоснование ремонта рамного судового набора баржи-площадки проекта №р-56 установкой на его стенки накладных листовых элементов. Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока, 2011, № 2, с. 136-141.
6. Бимбереков П.А. Стратегия и тактика обеспечения технического состояния корпусов судов внутреннего и смешанного плавания. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Федеральное государственное бюджетное

- образовательное учреждение высшего образования "Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова", 2016.
7. Бимбереков П.А., Никитин С.И., Медведев А.М. Оценка увеличения металлоемкости корпусов при повышении разрядов плавания судов поднадзорных Российскому Классификационному Обществу (РКО). Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока, 2024, № 2, с. 43-48.
 8. Бимбереков П.А., Никитин С.И., Медведев А.М. Оценочные выражения значений дополнительных масс, при повышении класса судов зарегистрированных в Российском Классификационном Обществе (РКО). Тенденции развития науки и образования, 2024. № 111-9, с. 13-18.
 9. Бимбереков П.А. Оценка экономической эффективности двух вариантов ремонта судовых перекрытий имеющих рамные балки с деформированными стенками. Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2008. №2. с.174-178.
 10. Пат. № 2448861 Способ модернизации или ремонта несущих элементов судовых конструкций (варианты): Российская Федерация, МПК В63В 9/00 / Бимбереков П.А.; заявитель и патентообладатель Бимбереков П.А. – №2011116007/11 ; заяв. 22.04.2011; опубл. 27.04.2012, бюл. №12.
 11. Ремонт речных судов: Справочник / Ю.К. Аристов, Ф.Ф. Бенуа, А.А. Вышеславцев и др.; Под ред. А.Ф. Видецкого. – М.: Транспорт, 1988. 431 с.
 12. Михайлов В.С. Плавка судовых сварных корпусных конструкций / ЦНИИ технологии судостроения. - Ленинград : Судостроение, 1972, 153 с.
 13. Телянер Б.Е., Турмов Г.П., Финкель Г.Н. Технология ремонта корпуса судна: учебное пособие. Л.: Судостроение, 1984. 288 с.
 14. Чистов В.Б. Технология ремонта корпусов судов. Конспект лекций. – Л.: ЛИВТ, 1978, 66 с.
 15. Harrington, E.C. / E.C. Harrington // Chem. Engng. Progr., vol. 42, №59, 1963, p. 132-147.
 16. Harrington, E.C. He desirability function / E.C. Harrington // Industrial Quality Control, vol. 21, № 10, 1965, p. 494-498.
 17. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий - М.: Наука, 1976, 279 с.
 18. Карташова, Т.М. Вопросы оптимизации при разработке рецептуры и технологии получения новых полимерных материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Т.М. Карташова. – М.: МХТИ им. Д.И. Менделеева, 1969.
 19. Маркова, Е.В. Комбинаторные планы в задачах многофакторного эксперимента / Е.В. Маркова, А.Н. Лисенков. - М.: Наука, 1979, 345 с.
 20. Радаман А., Томилин С.А., Ясаков Г.С. Состояние, перспективы развития и проблема выбора регулируемого электропривода в корабельных электро-энергетических системах/ Морской вестник, №2(22), 2007, с.45-47.
 21. Бимбереков П.А. О влиянии метода ремонта перекрытий на результаты оценки качества судна. Речной транспорт (XI век), 2014, №5, с.46-52.

References

1. Rossijskij Rechnoj Registr. Pravila. V 4 t. T.2. - М.: Novosti, 2009. - 406 s.
2. FAU «Rossijskoe Klassifikacionnoe Obshchestvo». Pravila klassifikacii i postroyki sudov. URL:<https://rfclass.ru/izdaniya-rko/pravila-klassifikacii-i-postroyki-i-osvidetelstvovaniya-sudov-vvp-sudov-smeshannogo-reka-more-plavaniya-plavuchikh-obektov/pravila-klassifikacii-i-postroyki-sudov/> (data obrashcheniya 18.05.25).
3. Bimberekov P.A. Ukрупnennaya ocenka meropriyatij modernizacii korpusa barzhi-ploshhadki proekta R-56 dlya povы`sheniya klassa s «R1,2» do «M3,0». Materialy` Mezhdunarodnoj yubilejnoj nauchno-texnicheskoj konferencii «Obnovlenie flota – aktual`naya problema vodnogo transporta na sovremennom e`tape». Ch.1. – Novosibirsk: FGOU VPO NGAVT, 2011. p.113-117.
4. Bimberekov P.A. Opy`t modernizacii barzh-ploshhadok proekta №R-56 s povы`sheniem klassa do «M3,0». Materialy` mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Problemy` i perspektivy` innovacionnogo razvitiya vodnogo transporta». Novosibirsk: FGOU VPO SSUWT, 2013. p.197-198.
5. Bimberekov P.A., Fomin A.V., Sashhikov N.A. E`ksperimental`noe obosnovanie remonta ramnogo sudovogo nabora barzhi-ploshhadki proekta №r-56 ustanovkoj na ego stenki

- nakladny`x listovy`x e`lementov. Nauchny`e problemy` transporta Sibiri i Dal`nego Vostoka, 2011, № 2, p. 136-141.
6. Bimberekov P.A. Strategiya i taktika obespecheniya texnicheskogo sostoyaniya korpusov sudov vnutrennego i smeshannogo plavaniya. Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni doktora texnicheskix nauk / Federal`noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel`noe uchrezhdenie vy`sshego obrazovaniya Gosudarstvenny`j universitet morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova, 2016.
 7. Bimberekov P.A., Nikitin S.I., Medvedev A.M. Ocenka uvelicheniya metalloemkosti korpusov pri povy`shenii razryadov plavaniya sudov podnadzorny`x Rossijskomu Klassifikacionnom Obshhestvu (RKO). Nauchny`e problemy` transporta Sibiri i Dal`nego Vostoka, 2024, № 2, p. 43-48.
 8. Bimberekov P.A., Nikitin S.I., Medvedev A.M. Ochenochny`e vy`razheniya znachenij dopolnitel`ny`x mass, pri povy`shenii klassa sudov zaregistrirrovanny`x v Rossijskom Klassifikacionnom Obshhestve (RKO). Tendencii razvitiya nauki i obrazovaniya, 2024. № 111-9, p. 13-18.
 9. Bimberekov P.A. Ocenka e`konomicheskoj e`ffektivnosti dvux variantov remonta sudovy`x perekry`tij imeyushhix ramny`e balki s deformirovanny`mi stenkami. Nauchny`e problemy` transporta Sibiri i Dal`nego Vostoka. 2008. №2. p.174-178.
 10. Pat. №2448861 Method of updating or repairing ship structure bearing components (versions), IPC E02 B 14/00 / Bimberekov, P.A.; applicant and patent holder Bimberekov, P.A. – No. 2011116007/11; appl. 22.04.2011; published 27.04.2012, Bulletin No. 12.
 11. Remont rechny`x sudov: Spravochnik / Yu.K. Aristov, F.F. Benua, A.A. Vy`sheslavcev i dr.; Pod red. A.F. Videczkogo. – M.: Transport, 1988. 431 p.
 12. Mixajlov V.S. Pravka sudovy`x svarny`x korpusny`x konstrukcij / CzNII texnologii sudostroeniya. - Leningrad : Sudostroenie, 1972, 153 p.
 13. Telyaner B.E., Turmov G.P., Finkel` G.N. Texnologiya remonta korpusa sudna: uchebnoe posobie. L.: Sudostroenie, 1984. 288 p.
 14. Chistov V.B. Texnologiya remonta korpusov sudov. Konspekt lekcij.– L.: LIVT, 1978, 66 p.
 15. Harrington, E.C. He desirability function / E.C. Harington // Industrial Quality Control, vol. 21, № 10, 1965, p. 494-498.
 16. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976, 279 с.
 17. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskij Yu.V. Planirovanie e`ksperimenta pri poiske optimal`ny`x uslovij - M.: Nauka, 1976, 279 p.
 18. Kartashova, T.M. Voprosy` optimizacii pri razrabotke receptury` i texnologii polucheniya novy`x polimerny`x materialov: avtoref. dis. ... kand. texn. nauk / T.M. Kartashova. – M: MXTI im. D.I. Mendeleeva, 1969.
 19. Markova, E.V. Kombinatorny`e plany` v zadachax mnogofaktornogo e`ksperimenta / E.V. Markova, A.N. Lisenkov. - M.: Nauka, 1979, 345 p.
 20. Radaman A., Tomilin S.A., Yasakov G.S. Sostoyanie, perspektivy` razvitiya i problema vy`bora reguliruемого e`lektroprivoda v korabel`ny`x e`lektro-e`nergeticheskix sistemax/ Morskoy vestnik, №2(22), 2007, p.45-47.
 21. Bimberekov P.A. O vliyaniy metoda remonta perekry`tij na rezul`taty` ocenki kachestva sudna. Rechnoj transport (XI vek). 2014. №5. p.46-52

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Бимбереков Павел Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Теории корабля, судостроения и технологии материалов, Сибирский государственный университет водного транспорта, 630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: bimberekov@yandex.ru

Pavel A. Bimberekov, Dr. Sci. (Eng), Assistant professor, Professor of the Department Ship Theory, Shipbuilding and Materials Technology, Siberian State University of Water Transport, 630099, Novosibirsk, Shchetinkina str., 33, e-mail: bimberekov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 19.12.2025; принята к публикации 05.02.2026; опубликована онлайн 20.03.2026. Received 19.12.2025; published online 20.03.2026.

УДК 629.576

DOI: 10.37890/jwt.vi86.686

Продувка крыла профиля Clark YH 8% вблизи поверхности экрана

Н.Е. Румянцев^{1,2}

ORCID: 0009-0007-4920-7407

В.П. Морозов¹

ORCID: 0009-0000-3196-8020

Е.С. Шишов^{1,2}

ORCID: 0009-0009-3855-7887

Н.С. Гладышев^{1,3}

ORCID: 0009-0008-6108-6596

¹*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия*

²*Центральное конструкторское бюро по судам на подводных крыльях им. Р.Е. Алексеева., г. Нижний Новгород, Россия*

³*Филиал ПАО «ОАК» - НАЗ «Сокол»*

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального исследования аэродинамических характеристик модифицированного профиля Clark YH 8% в условиях экранного эффекта. Модель крыла с удлинением $\lambda=2$ была изготовлена с использованием аддитивной FDM-технологии, что позволило значительно сократить время и стоимость производства по сравнению с традиционными методами.

Испытания проводились в аэродинамической трубе на скорости 27 м/с как вне экрана, так и вблизи экрана на относительной высоте полета $\bar{h}=0,15$. Проанализировано влияние экрана и угла атаки на коэффициенты подъемной силы, сопротивления и аэродинамического качества. Показано, что экранный эффект существенно повышает подъемную силу крыла и его аэродинамическое качество.

Исследование демонстрирует целесообразность применения 3D-печати для быстрого и экономичного исследования моделей на начальных этапах проектирования.

Ключевые слова: экранный эффект, аэродинамические характеристики, профиль Clark YH 8%, FDM-печать, экраноплан.

Wind tunnel testing of the Clark YH 8% profile wing near the ground surface

Nikita E. Rumyantsev^{1,2}

ORCID: 0009-0007-4920-7407

Viktor P. Morozov¹

ORCID: 0009-0000-3196-8020

Egor S. Shishov^{1,2}

ORCID: 0009-0009-3855-7887

Nikita S. Gladyshev^{1,3}

ORCID: 0009-0008-6108-6596

¹*Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia*

²*R.E. Alekseev Central Hydrofoil Design Bureau, Nizhny Novgorod, Russia*

³*Branch of PJSC «UAC» - NAZ «Sokol»*

Abstract. The article presents the results of an experimental study of the aerodynamic characteristics of a modified Clark YH 8% profile under conditions of a screen effect. The wing model with an elongation of $\lambda=2$ was manufactured using additive FDM technology, which significantly reduced the production time and cost compared to traditional methods. The tests were carried out in a wind tunnel at a speed of 27 m/s both outside the screen and near the screen at a relative flight altitude of $h = 0.15$. The influence of the screen and angle of attack on the coefficients of lift, drag, and aerodynamic quality is analyzed. It is shown that the screen effect significantly increases the lifting force of the wing and its aerodynamic quality. The study demonstrates the feasibility of using 3D printing for fast and cost-effective model research at the initial stages of design.

Keywords: Ground effect, aerodynamic characteristics, Clark YH 8% profile, FDM printing, ekranoplane.

Введение

Современные аэродинамические исследования требуют создания моделей, сочетающих точность геометрии, механическую прочность и минимальную стоимость изготовления. Особую актуальность эта задача приобретает при изучении сложных физических явлений, таких как экранный эффект, где необходимо проводить многочисленные повторения испытаний. Традиционное изготовление металлических моделей, обладающих высокой точностью, часто оказывается чрезмерно дорогостоящим и длительным по времени изготовления, что ограничивает возможности исследователей (особенно для студентов и аспирантов).

В данной статье рассматривается применение аддитивных технологий послойного наплавления филамента (FDM) для быстрого и экономичного прототипирования модели крыла экраноплана. В качестве объекта исследования был выбран модифицированный профиль Clark YH 8%, адаптированный для работы вблизи экранной поверхности. Модель с удлинением $\lambda=2$ была испытана в аэродинамической трубе с целью определения влияния экрана и угла атаки на её аэродинамические характеристики. Более подробно о физико-механических свойствах изделий, изготовленных по технологии 3D-печати описано в учебном пособии [1].

Целью работы является оценка целесообразности использования FDM-печати для первичных аэродинамических исследований, а также экспериментальное изучение особенностей обтекания прямоугольного крыла конечного размаха вблизи экрана. Проведенные испытания демонстрируют потенциал аддитивных технологий для существенного сокращения затрат и сроков проведения исследований.

1. Модель крыла экраноплана

Для крыла экраноплана был выбран авиационный профиль Clark YH 8%, который впоследствии был изменён в зоне хвостовой оконечности. Данное изменение было произведено с целью повышения влияния экрана на подъёмные качества экраноплана. Исходный и изменённый профили представлены на рисунке 1. Координаты исходного профиля были взяты из [2].

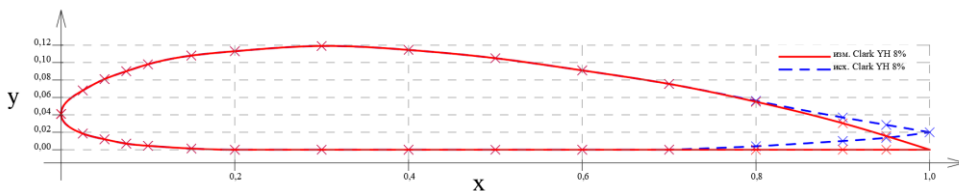


Рис. 1. Исходный (синий) и измененный (красный) профили Clark YH 8%

Координаты исходного и измененного профилей представлены в таблице 1.

Таблица 1

Координаты профилей Clark YH 8%

Исходный			Измененный		
X	Уверх	Униз	X	Уверх	Униз
0,0	0,0410	0,0410	0,0	0,0410	0,0410
0,025	0,0680	0,0185	0,025	0,0680	0,0185
0,05	0,0810	0,0120	0,05	0,0810	0,0120
0,075	0,0900	0,0070	0,075	0,0900	0,0070
0,1	0,0980	0,0045	0,1	0,0980	0,0045
0,15	0,1080	0,0000	0,15	0,1080	0,0000
0,2	0,1130	0,0000	0,2	0,1130	0,0000
0,3	0,1190	0,0000	0,3	0,1190	0,0000
0,4	0,1145	0,0000	0,4	0,1145	0,0000
0,5	0,1050	0,0000	0,5	0,1050	0,0000
0,6	0,0910	0,0000	0,6	0,0910	0,0000
0,7	0,0755	0,0000	0,7	0,0755	0,0000
0,8	0,0560	0,0040	0,8	0,0550	0,0000
0,9	0,0370	0,0100	0,9	0,0304	0,0000
0,95	0,0285	0,0137	0,95	0,0172	0,0000
1,0	0,0210	0,0200	1,0	0,0010	0,0000

Модель крыла имеет удлинение $\lambda=2$, где размах крыла модели $l=500$ мм, а хорда составляет $b=250$ мм. Модель крыла изготовлена в 1:40 масштабе. На рисунке 2 представлена 3D-модель крыла с креплениями, а на 3 крыло в аэродинамической трубе.

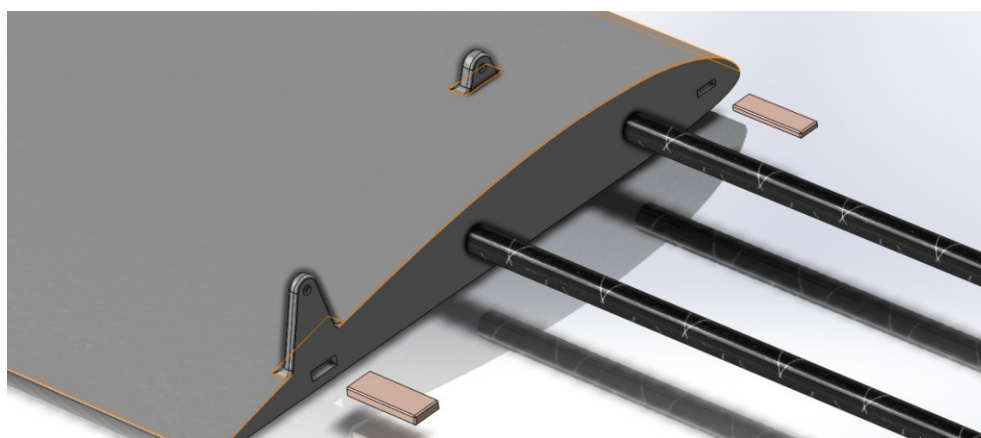


Рис. 2. 3D-модель крыла с поперечными лонжеронами и шпонками



Рис. 3. Крыло в аэродинамической трубе

Параметры крыла выбирались исходя из глобальной задачи (проектирование оптимального экраноплана), более подробно особенности выбора типа крыла, размерений и особенности конструкции описаны в [3] и [4].

2. Особенности выбора типа крыла и его продувки в аэродинамической трубе

Крыло продувалось в малой аэродинамической трубе (диаметр трубы составляет около 700 мм). Труба создает напор с помощью толкающего винта, что создаёт дополнительную турбулентность, т.е. более предпочтительным является использование винта тянущего типа, т.к. он создаёт более ламинарный поток. Спрямляющие решётки полноценно не смогли стабилизировать поток.

Одна из проблем, которая возникает при турбулентном типе истечения – замер скорости потока. В различных точках измерительного сечения скорость потока неодинакова и может принимать значения, близкие к нулю, что не соответствует действительной средней скорости потока.

Переход пограничного слоя с ламинарного на турбулентный существенно меняет характеристики крыла – его сопротивление и подъёмную силу, что часто приводит к завышению сопротивления и занижению подъёмной силы.

Схема трубы, в которой производилась продувка крыла, представлена на рисунке 4. Более подробную информацию о аэродинамической трубе и методиках продувки можно узнать в источнике [5].

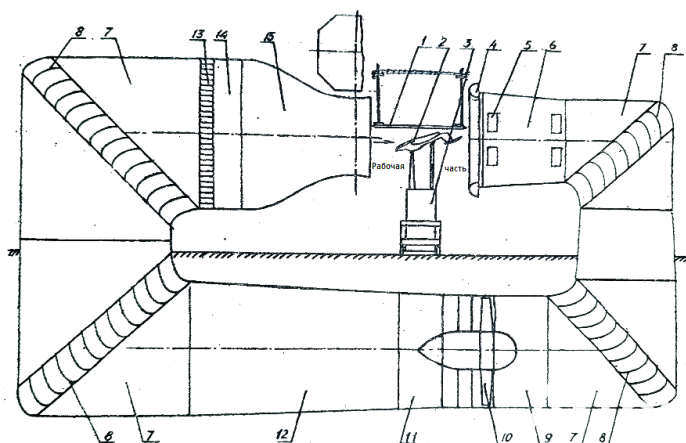


Рис. 4. Схема аэродинамической трубы

На рисунке 4 имеются следующие обозначения: 1 – плоская металлическая пластина; 2 – исследуемая модель; 3 – аэродинамические весы; 4 – профилированный приемник; 5 - специальные выпускные окна; 6 – коллектор; 7 – поворотные колена; 8 – направляющие лопатки, которые представляют собой тонколистовые металлические пластины, имеющие в поперечном сечении одинаковый выпукло-вогнутый профиль; 9 – переходник с восьмиугольного сечения в круглое; 10 – осевой вентилятор; 11 – выходной переходник с круглого сечения в восьмиугольное; 12 – обратный канал; 13 – форкамера; 14 - спрямляющие решетки (хонейкомб); 15 – сопло.

Как говорилось выше, крыло имеет удлинение $\lambda=2$, исходя из статьи [6], данное решение не является оптимальным относительно аэродинамики крыла, но в общей задаче одним из наиболее оптимальных.

В пользу крыльев с удлинением $\lambda=2\div3$ говорит опыт ЦКБ по СПК им. Р.Е. Алексеева в сфере экранопланов, который описан в источниках [7] и [8].

Исследования в источнике [6] проводились с прямоугольными крыльями профиля ЦАГИ-876. Крылья имели односторонние тонкие концевые шайбы, направленные вниз в сторону экранирующей поверхности, высотой $\bar{H} = h/b$.

На рисунке 5 представлены виды крыльев и способ продувки крыльев вблизи экрана. На рисунке 6 представлена зависимость производной подъемной силы $c_y^{\bar{h}}$ от удлинения крыла. Рисунки 5-8 заимствованы из источника [6].

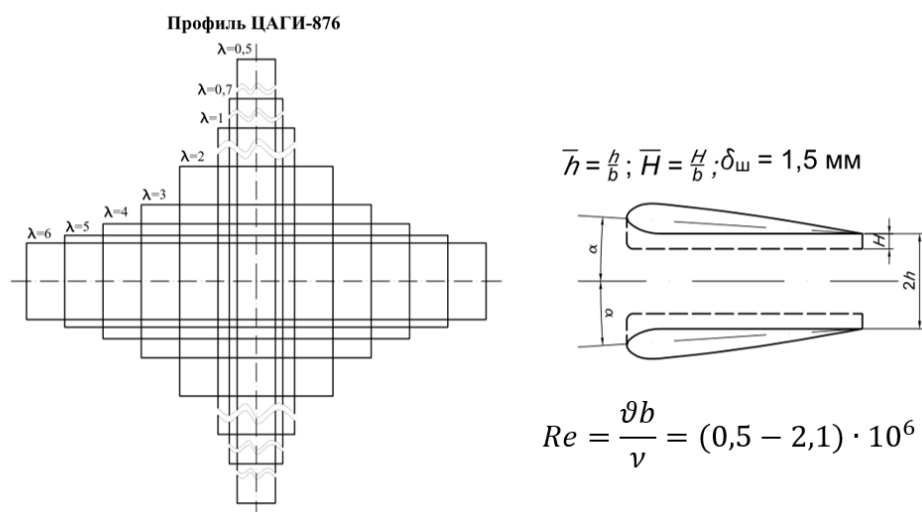


Рис. 5. Виды крыльев и способ продувки крыльев вблизи экрана

Значение производной $c_y^{\bar{h}}$ увеличивается по модулю с уменьшением высоты и ростом угла атаки α , причем сильнее у крыла с большим удлинением. Оно возрастает с увеличением удлинения до $\lambda \approx 3$, а при больших удлинениях увеличение продолжается слабее и $c_y^{\bar{h}} \rightarrow 1,1$ ($\bar{h} = 0,2$), где \bar{h} - относительная высота полета, которая определяется путём деления высоты полёта (расстояние от самой нижней точки крыла до поверхности экрана) на хорду крыла.

Величина $c_y^{\bar{h}}$ является ключевой в уравнениях продольного движения летательного аппарата. Она напрямую влияет на запас продольной устойчивости и демпфирование колебаний по тангажу. Чем больше модуль этого коэффициента (т.е. чем он отрицательнее), тем лучше демпфирование и выше устойчивость.

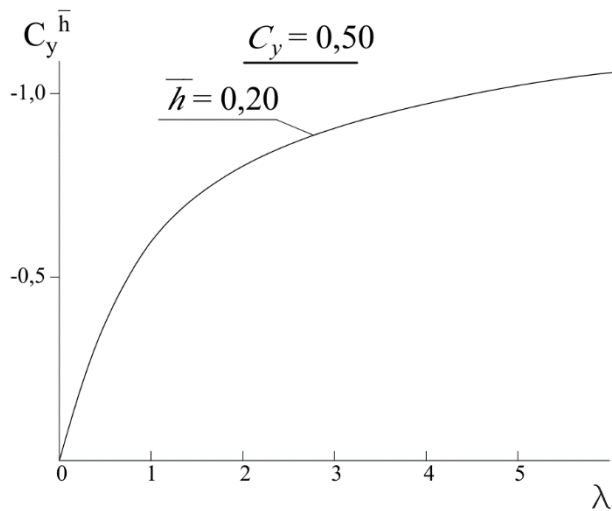


Рис. 6. Зависимость производной подъемной силы $C_y^{\bar{h}}$ от удлинения крыла

Малое удлинение негативно влияет на безопасность полёта – по графику (рисунок 7) видно, что при изменении угла атаки у крыльев с удлинением 1 и 5 на одинаковое значение, происходит разное изменение производной подъемной силы, т.е. в случае стечения воедино неблагоприятных факторов (сильный поток ветра и др.) это может привести к аварии экранопланов с крыльями малого удлинения. Экранопланы с крыльями малого удлинения также склонны к раскачке.

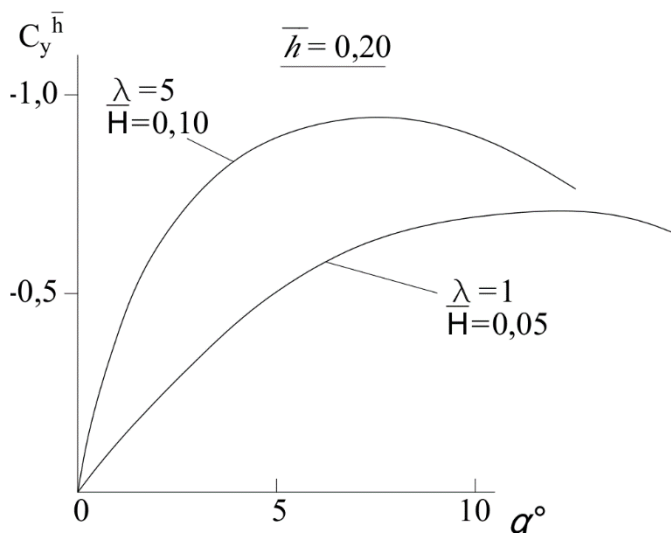


Рис. 7. Влияние угла атаки и удлинения крыла на коэффициент подъемной силы от относительной высоты полёта $\bar{h} = 0,2$

Но при этом малое удлинение ухудшает аэродинамическое качество аппарата, а значит и его экономику, т.е. аппарат с чрезмерно малым удлинением может быть нецелесообразен. На рисунке 8 показано влияние удлинения на аэродинамическое качество крыла.

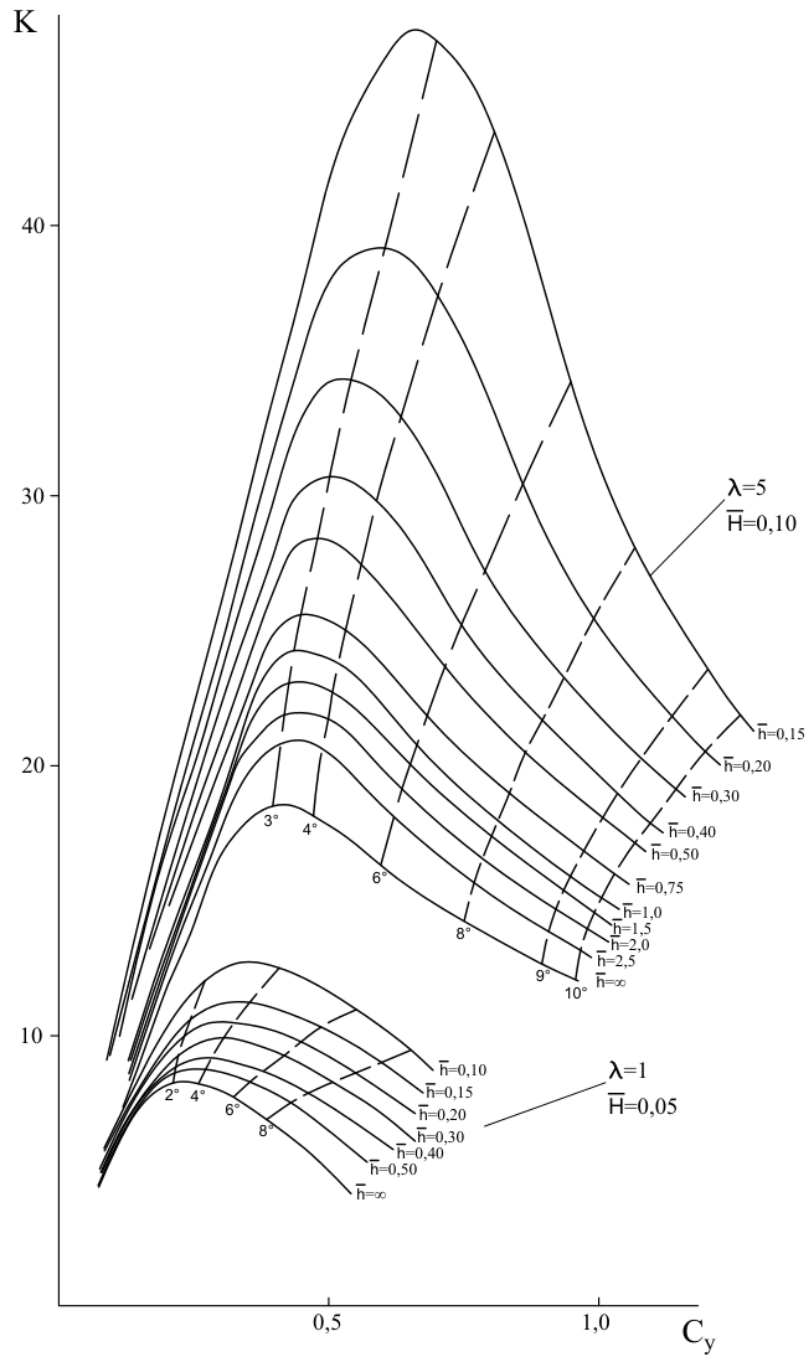


Рис. 8. Повышение аэродинамическое качества крыла в зависимости от удлинения крыла и относительной высоты полёта

3. Результаты и обсуждение

На рисунках 9-11 представлены обобщённые кривые продувки крыла на скорости 27 м/с как вне экрана, так и на высоте 0,15 хорды крыла ($\bar{h} = 0,15$). Ось x – углы атаки в градусах, ось y – коэффициенты сопротивления, подъёмной силы, аэродинамического качества. Ввиду выявленной повышенной турбулентности потока в рабочей части трубы, полученные данные следует рассматривать как оценочные, отражающие в большей степени качественные закономерности, нежели абсолютные величины.

Скорость потока измеряли несколькими способами для взаимной проверки данных: с помощью встроенного в аэродинамическую трубу жидкостного манометра и пары электрических анемометров. Наличие нескольких измерительных приборов позволяло повысить надёжность результатов.

Аэродинамические коэффициенты определялись путём пересчёта. При продувке крыла оператор получал значения в вольтах. Имея коэффициенты пересчёта (датчики сил были предварительно оттарированы), которые определялись перед экспериментами, происходил пересчёт полученных значений в силы. После обработки полученных результатов, происходил вторичный пересчёт, только уже с сил на коэффициенты сопротивления и подъёмной силы. Данная форма записи результатов (в коэффициентах) является более предпочтительной, т.к. является универсальной для всех масштабов крыла.

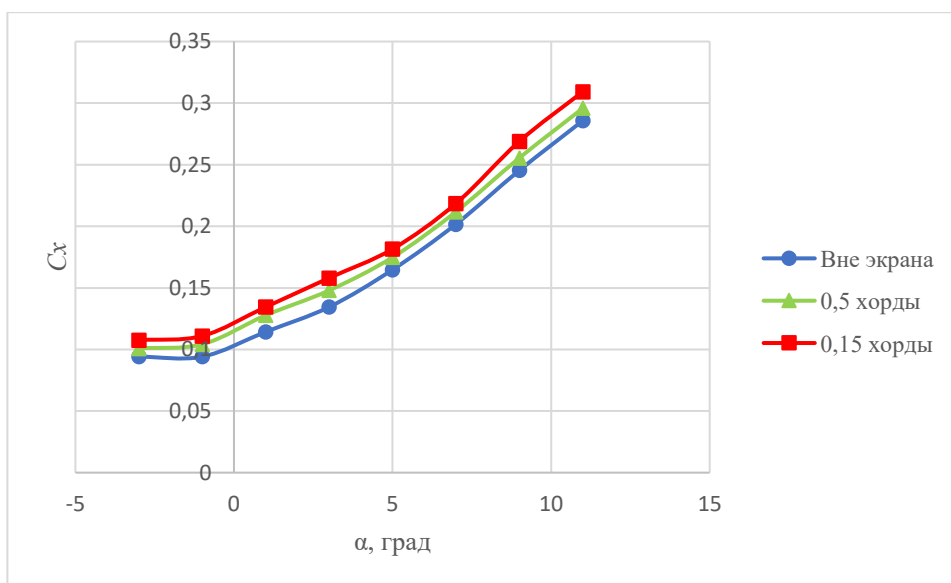


Рис. 9. Кривые зависимости коэффициента сопротивления от относительной высоты полёта и угла атаки

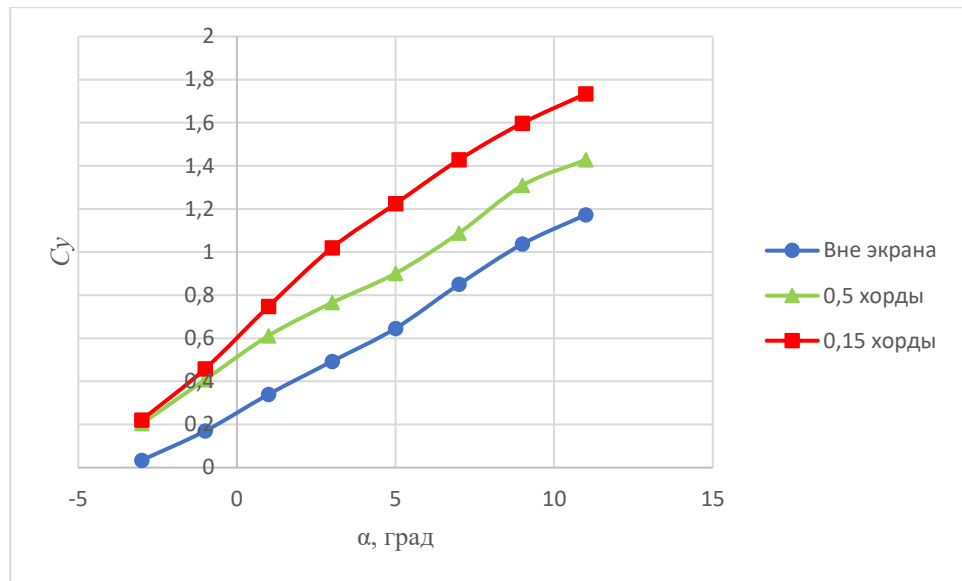


Рис. 10. Кривые зависимости коэффициента подъемной силы от относительной высоты полёта и угла атаки

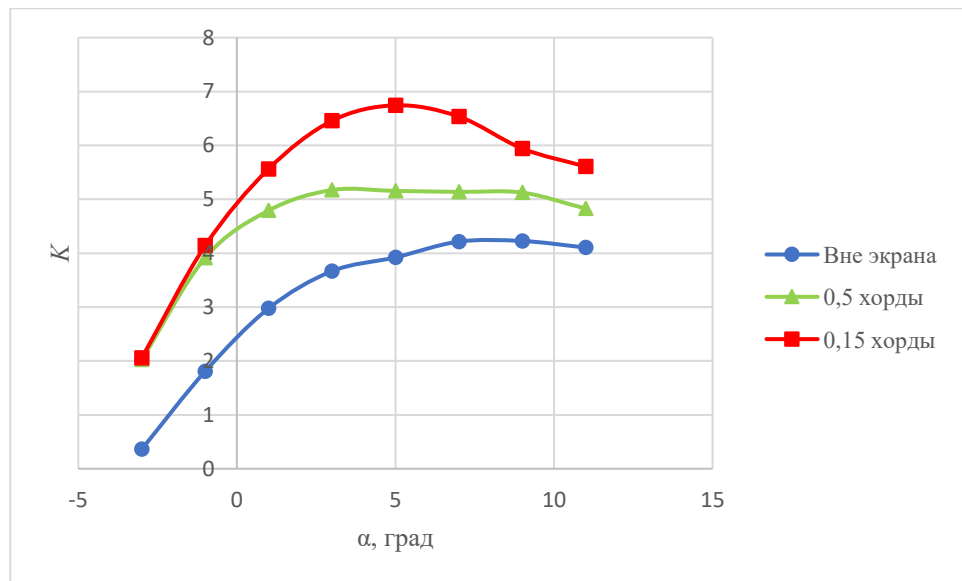


Рис. 11. Кривые зависимости аэродинамического качества от относительной высоты полёта и угла атаки

На рисунках 12-16 представлены графики с относительными значениями, т.е. где ось x – значения крыла вне экрана, а все что выше или ниже данной оси (по оси y) – отличие в % значениях.

Относительные величины считались по формуле процентного прироста:

$$Cx = \frac{Cx_i - Cx_{вне\ экр}}{Cx_{вне\ экр}} \cdot 100\%$$

где C_x – значение прироста в %, C_{xi} – значение в исследуемой точке (на определённой высоте в зоне экранного эффекта при определённых условиях), $C_{x \text{ вне экр}}$ – значения, полученные при аналогичных условиях, что и в C_{xi} , но вне экрана.

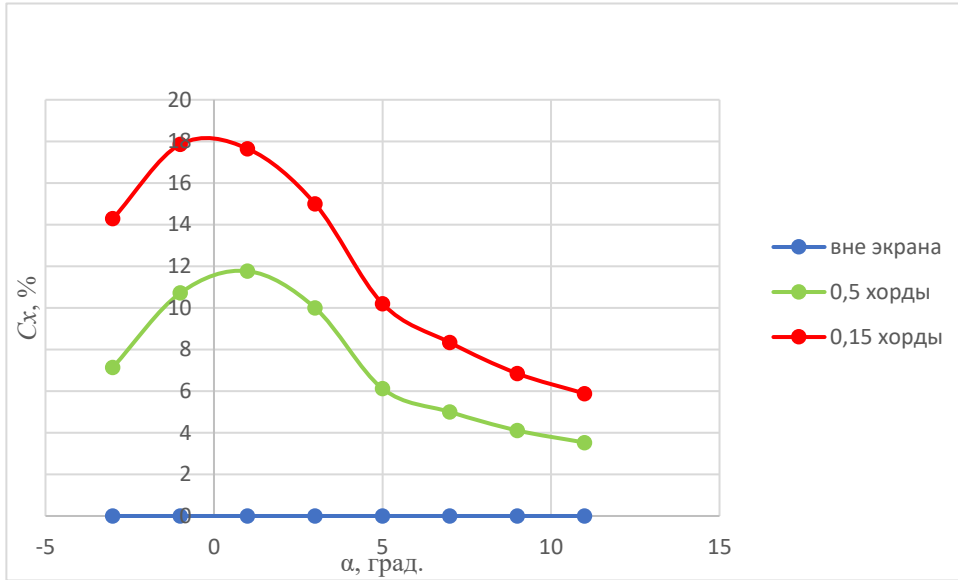


Рис. 12. Кривые зависимости коэффициента сопротивления от относительной высоты полёта и угла атаки по отношению к значениям крыла вне экрана

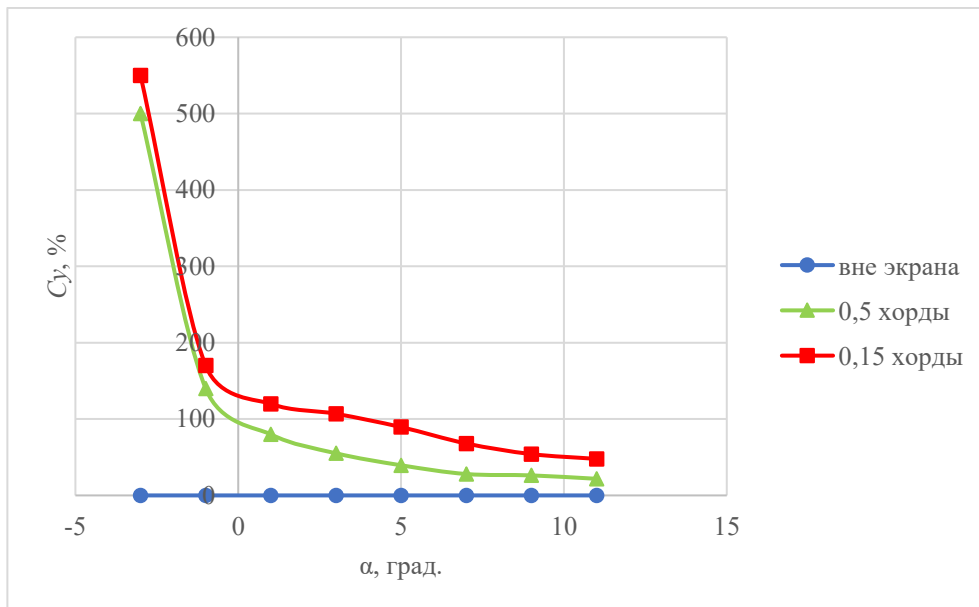


Рис. 13. Кривые зависимости коэффициента подъемной силы от относительной высоты полёта и угла атаки по отношению к значениям крыла вне экрана

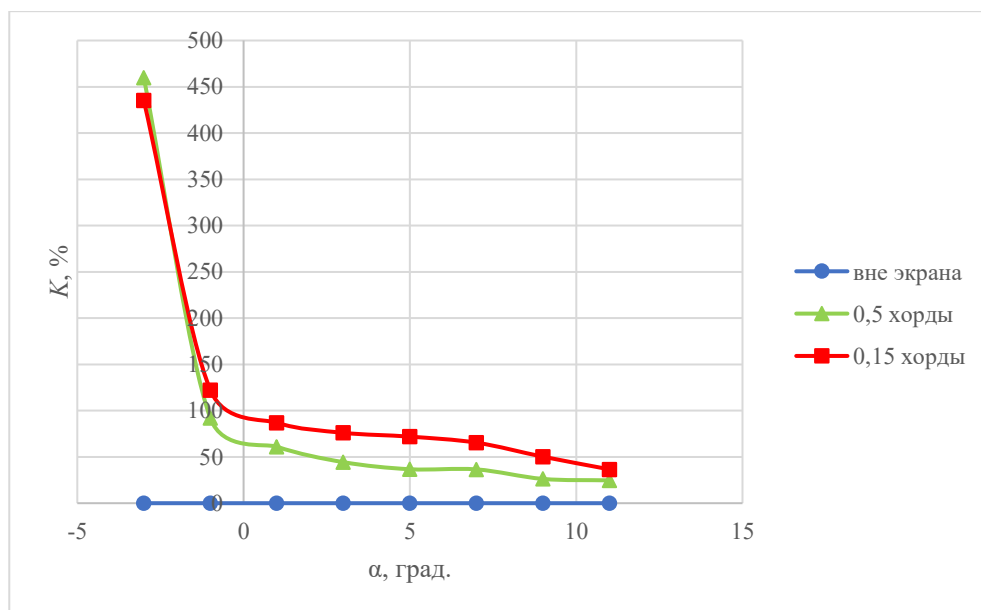


Рис. 14. Кривые зависимости аэродинамического качества от относительной высоты полёта и угла атаки по отношению к значениям крыла вне экрана

Ниже представлены графики, где отдельно отображена зона до 150% для кривых коэффициентов подъёмной силы и аэродинамического качества.

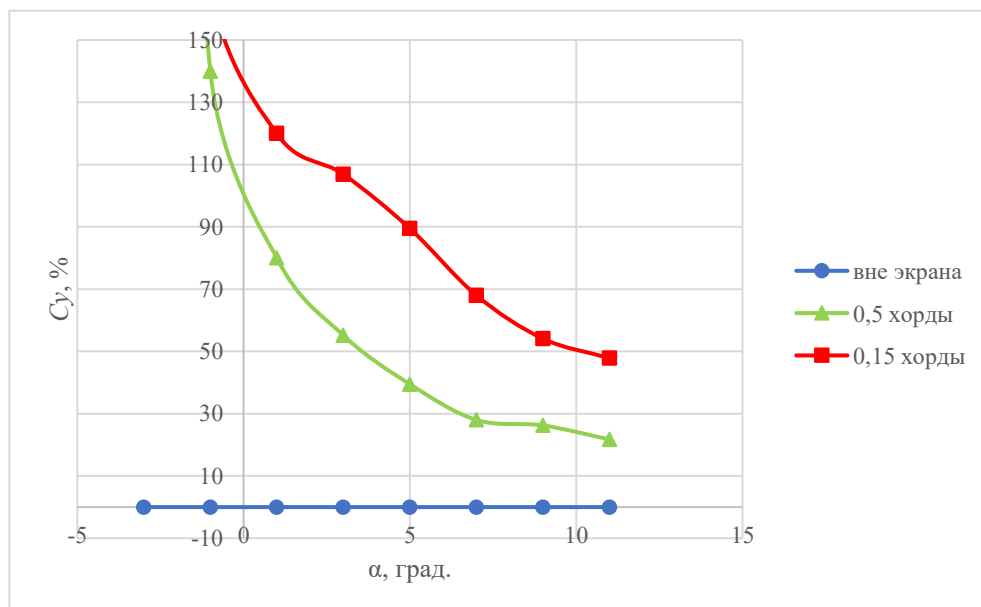


Рис. 15. Кривые зависимости коэффициента подъёмной силы от относительной высоты полёта и угла атаки по отношению к значениям крыла вне экрана, ограниченные областью до 150%

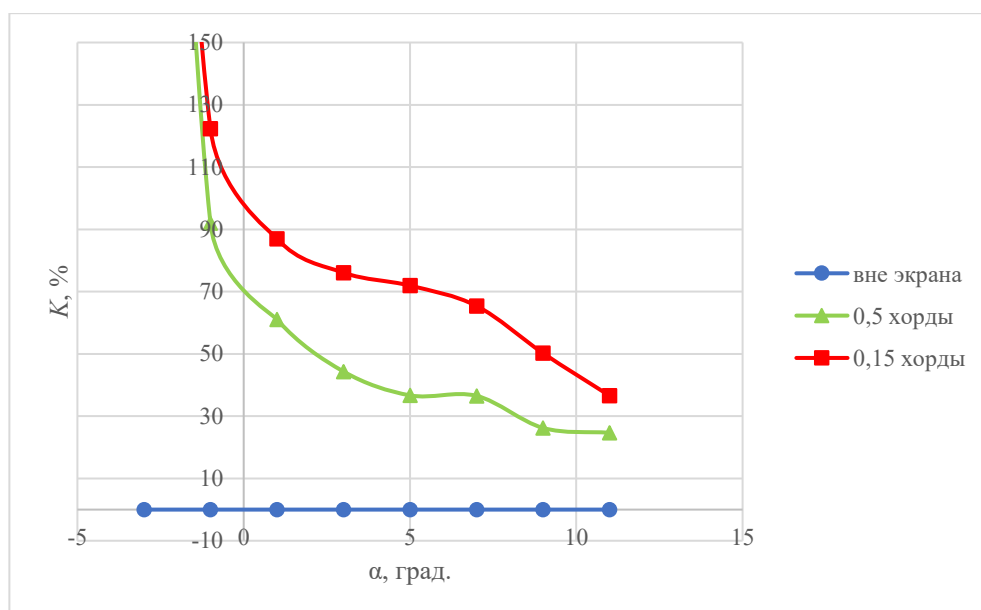


Рис. 16. Кривые зависимости аэродинамического качества от относительной высоты полёта и угла атаки по отношению к значениям крыла вне экрана, ограниченные областью до 150%

Необходимо отметить, что крыло продувалось без концевых шайб, которые повышают подъёмную силу крыла и аэродинамическое качество. Данному исследованию будет посвящена следующая статья.

Авторы из источника [9] делают схожие выводы и влиянии экрана на аэродинамику экраноплана.

Заключение

Изготовленная по технологии FDM-печати модель *крыла* с профилем Clark YH 8% показала свою пригодность для проведения первичных аэродинамических исследований.

Результаты исследований подтверждают, что данный метод прототипирования позволяет сократить время и стоимость изготовления моделей по сравнению с традиционными методами.

Экспериментальные данные подтвердили существенное влияние экранного эффекта на аэродинамические характеристики крыла. Было зафиксировано изменение коэффициентов подъемной силы и сопротивления, а также аэродинамического качества при полете на малой относительной высоте ($\bar{h} = 0,15$) по сравнению с продувкой вне влияния экранной поверхности.

Результаты продувки свидетельствуют о том, что при приближении к экранной поверхности наблюдается рост коэффициента подъемной силы крыла при незначительном изменении сопротивления, что ведёт к повышению аэродинамического качества. Удлинение крыла оказывает значительное влияние на аэродинамическое качество аппарата

Полученные результаты являются первым этапом и демонстрируют перспективность применения аддитивных технологий для быстрой проверки теоретических гипотез и оптимизации геометрии на ранних стадиях проектирования. В рамках дальнейших исследований планируется изучение влияния концевых шайб на характеристики крыла вблизи экрана, а также испытания моделей с большим удлинением для комплексной оптимизации аэродинамических параметров проектируемого аппарата.

Целесообразность оснащения крыльев концевыми шайбами отражена в отчете ЦАГИ [10], где представлены экранопланы различных конструкций. Использование концевых шайб базируется на обобщении мирового инженерного опыта.

Список литературы

1. Шкуро А. Е. Технологии и материалы 3D-печати / А. Е. Шкуро, П. С. Кривоногов. — Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2017. — 98 с.
2. Clark YH 8%. — Текст : электронный // Airfoiltools.
URL: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=clarky-il> (дата обращения: 10.11.2025).
3. Морозов В. П. Проектирование скоростных судов с динамическими принципами поддержания. Основы проектирования экранопланов : учебное пособие / В. П. Морозов, П. Л. Спехов. — Нижний Новгород : Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева, 2024. — 134 с.
4. Февральских А. И. Разработка методики проектирования аэрогидродинамической компоновки амфибийного судна на воздушной подушке с аэродинамической разгрузкой на основе численного моделирования: дис. ... канд. техн. наук : 05.08.01 ; 05.08.03 / А. И. Февральских. — Нижний Новгород, 2017. — 175 с.
5. Болотин А. А. Изучение аэродинамических характеристик модели экраноплана / А. А. Болотин, А. Н. Попов, В. Ф. Чеботаев. — Нижний Новгород : Нижегород. гос. техн. ун-т, 2001. — 18 с.
6. Мусатов Р. А. Особенности влияния удлинения прямоугольных крыльев на аэродинамические характеристики вблизи экрана / Р. А. Мусатов. — Текст : непосредственный // Сборник докладов IV научной конференции по гидроавиации «Гидроавиасалон-2002». — 2002. — С. 273—280.
7. Кирилловых В. Н. История ЦКБ по судам на подводных крыльях им. Р. Е. Алексеева. Том 1. Ростислав Евгеньевич Алексеев в истории создания ЦКБ по судам на подводных крыльях / В. Н. Кирилловых, Т. Р. Алексеева, Ю. П. Чернигин. — Нижний Новгород : АО «ЦКБ по СПК им. Р. Е. Алексеева» : Кварц, 2016. — 336 с.
8. Кирилловых В. Н. История ЦКБ по судам на подводных крыльях им. Р. Е. Алексеева. Том 2. Боевые экранопланы конструктора Алексеева / В. Н. Кирилловых, А. А. Беляев, О. В. Салахова. — Нижний Новгород : АО «ЦКБ по СПК им. Р. Е. Алексеева» : Кварц, 2021. — 302 с.
9. Wang H. Computational Aerodynamics and Flight Stability of Wing-In-Ground (WIG) Craft / H. Wang, C. J. Teo, B. C. Khoo, C. J. Goh. — Текст : электронный // ScienceDirect. — Elsevier, 2013. — С. 15—24.
10. Ильин В. Е. Экранопланы / В. Е. Ильин. — Текст : непосредственный // Новости зарубежной науки и техники. Техническая информация. Серия: авиационная и ракетная техника / Центр. аэрогидродинам. ин-т им. проф. Н. Е. Жуковского. — 2010. — № 4-5. — 82 с.

References

1. Shkuro A. E. Technologies and materials of 3D printing / A. E. Shkuro, P. S. Krivonogov. — Yekaterinburg : Ural State Forestry Engineering University, 2017. — 98 p.
2. Clark YH 8%. — Text : electronic // Airfoiltools. —
URL: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=clarky-il> (accessed: 10.11.2025).
3. Morozov V. P. Design of high-speed vessels with dynamic principles of maintenance. Fundamentals of ekranoplane design : a textbook / V. P. Morozov, P. L. Spekhov. — Nizhny Novgorod : Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, 2024. — 134 p.
4. Fevral'skikh A. I. Development of a methodology for designing the aerohydrodynamic layout of an amphibious hovercraft with aerodynamic unloading based on numerical modeling : PhD thesis : 05.08.01 ; 05.08.03 / A. I. Fevral'skikh. — Nizhny Novgorod, 2017. — 175 p.
5. Bolotin A. A. The study of aerodynamic characteristics of an ekranoplane model / A. A. Bolotin, A. N. Popov, V. F. Chebotaev. — Nizhny Novgorod : Nizhny Novgorod State Technical University, 2001. — 18 p.
6. Musatov R. A. Features of the Influence of the Extension of Rectangular Wings on Aerodynamic Characteristics Near the Screen / R. A. Musatov // Collection of Papers from the IV Scientific Conference on Hydroaviation, Hydroaviasalon-2002. — 2002. — Pp. 273—280.
7. Kirillov V. N. The history of the R. E. Alekseev Hydrofoil Design Bureau. Volume 1. Rostislav Evgenievich Alekseev in the history of the creation of the Central Design Bureau for Hydrofoil

- vessels / V. N. Kirillov, T. R. Alekseeva, Yu. P. Chernigov. — Nizhny Novgorod : JSC Central Design Bureau for SEC named after R. E. Alekseev ; Quartz, 2016. — 336 p.
8. Kirillov V. N. The history of the Central Design Bureau for hydrofoils named after R. E. Alekseev. Volume 2. Combat ekranoplanes designed by Alekseev / V. N. Kirillov, A. A. Belyaev, O. V. Salakhova. — Nizhny Novgorod : JSC Central Design Bureau for SEC named after R. E. Alekseev ; Quartz, 2021. — 302 p.
9. Wang H. Computational Aerodynamics and Flight Stability of Wing-In-Ground (WIG) Craft / H. Wang, C. J. Teo, B. C. Khoo, C. J. Goh. — Text : electronic // ScienceDirect. — Elsevier, 2013. — Pp. 15—24.
10. Ilyin V. E. Ekranoplans / V. E. Ilyin. — Text : direct // News of foreign science and technology. Technical information. Series: aviation and rocket technology / Central Aerohydrodynamic Institute named after prof. N. E. Zhukovsky.— 2010 — No. 4-5.— 82 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Румянцев Никита Евгеньевич, аспирант 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, 24к1, инженер-конструктор 3 категории, центральное конструкторское бюро по судам на подводных крыльях им. Р.Е. Алексеева, 603003, Нижегородская область, г. Нижний Новгород, ул. Свободы, д. 51, e-mail: rnikita00@gmail.com

Морозов Виктор Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Кораблестроение и авиационная техника», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (ФГБОУ ВО НГТУ им. Р.Е. Алексеева), 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24к1, e-mail: vpmorozovnn@mail.ru

Шишов Егор Сергеевич, аспирант, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (ФГБОУ ВО НГТУ им. Р.Е. Алексеева), 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24к1, центральное конструкторское бюро по судам на подводных крыльях им. Р.Е. Алексеева, 603003, Нижегородская область, г. Нижний Новгород, ул. Свободы, д. 51, email: egor370mv@gmail.com

Гладышев Никита Сергеевич, аспирант кафедры «Кораблестроение и авиационная техника», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, Нижний Новгород (ФГБОУ ВО НГТУ им. Р.Е. Алексеева), ул. Минина, 24к1, инженер-конструктор, Филиал ПАО «ОАК» - НАЗ «Сокол», 603035, г. Нижний Новгород, ул. Чаадаева, 1, e-mail: mr.gladnik@yandex.ru

Nikita E. Rumyantsev, postgraduate student at the Department of «Shipbuilding and Aircraft Engineering», Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev (NSTU n.a. R.E. Alekseev), 603155, Nizhny Novgorod, Minina St., 24 bldg. 1, Category 3 Design Engineer, R.E. Alekseev Central Hydrofoil Design Bureau, 603003, Nizhny Novgorod, Svobody St., 51, e-mail: rnikita00@gmail.com

Victor P. Morozov, Ph.D. (Eng), Assistant Professor at the Department of «Shipbuilding and Aircraft Engineering», Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev (NSTU n.a. R.E. Alekseev), 603155, Nizhny Novgorod, Minina St., 24 bldg. 1, e-mail: vpmorozovnn@mail.ru

Egor S. Shishov, postgraduate student, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev (NSTU n.a. R.E. Alekseev), 603155, Nizhny Novgorod, Minina St., 24 bldg. 1, Category 3 Design Engineer, R.E. Alekseev Central Hydrofoil Design Bureau, 603003, Nizhny Novgorod, Svobody St., 51, e-mail: egor370mv@gmail.com

Nikita S. Gladyshev, postgraduate student at the Department of «Shipbuilding and Aircraft Engineering», Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev (NSTU n.a. R.E. Alekseev), 603155, Nizhny Novgorod, Minina St., 24 bldg. 1, Design Engineer, Branch of PJSC «UAC» - NAZ «Sokol», Nizhny Novgorod, Chaadaeva St., 1, e-mail: mr.gladnik@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 18.12.2025; принята к публикации 19.02.2026; опубликована онлайн 20.03.2026. Received 18.06.2025; published online 20.03.2026.

УДК 004.925.83
DOI: 10.37890/jwt.vi86.615

Оптимизация конструкции выносной рамы спускоподъемного устройства для телеуправляемого подводного аппарата

А.Ю. Рыченкова

ORCID: 0000-0002-6477-6305

*Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова,
г. Новороссийск, Россия*

Аннотация. В статье дан краткий обзор различных типов спуско-подъемных устройств для подводных аппаратов, проанализированы их конструктивные особенности и условия эксплуатации. Показано, что наиболее нагруженным элементом конструкции спуско-подъемного устройства является поворотная рама, служащая для выноса подводного аппарата за борт, поэтому разработка оптимальной конструкции рамы является актуальной и экономически целесообразной задачей. Обоснован выбор конструкции выносной рамы в виде П-образной металлоконструкции, обусловленный заданным типом спускаемого аппарата и условий эксплуатации спускоподъемного устройства. Предложена методика оптимизации конструкции выносной рамы, которая является универсальной и может быть использована для любых металлоконструкций из профильных труб. Для всех исследуемых вариантов конструкции было выполнено трехмерное твердотельное моделирование в отечественной САПР Компас 3D и прочностной расчет с помощью подсистемы АПМ FEM. Произведен сравнительный анализ прочностных и весовых характеристик рамы при изменении ее конструктивных параметров. В результате исследования определена оптимальная конструкция П-образной выносной рамы спускоподъемного устройства с учетом заданного критерия оптимальности.

Keywords: устройство спуска и подъема, морской подводный аппарат, металлоконструкция, трехмерное моделирование, статический расчёт прочности, внутренние напряжения, коэффициент запаса прочности.

Optimization of the outrigger frame design of the descent device for a remote-controlled underwater vehicle

Anna Yu. Rychenkova

ORCID: 0000-0002-6477-6305

Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russia

Abstract: The article provides a brief overview of various types of descent and ascent devices for underwater vehicles, and analyzes their design features and operating conditions. It is shown that the most heavily loaded element of the descent and ascent device is the rotary frame, which is used to carry the underwater vehicle overboard. Therefore, developing an optimal frame design is an important and cost-effective task. The article justifies the choice of a P-shaped metal structure as the design of the outboard frame, based on the specific type of the descending vehicle and the operating conditions of the descent and ascent device. A method for optimizing the design of an outrigger frame has been proposed, which is universal and can be used for any design made of profile pipes. For all the studied design options, three-dimensional solid modeling was performed in the domestic CAD system Compass 3D, and a strength analysis was performed using the APM FEM subsystem. A comparative analysis of the frame's strength and weight characteristics was performed by changing its design parameters. As a result of the study, the optimal design of the U-shaped remote frame of the descent and ascent device was determined, taking into account the specified optimality criterion.

Keywords: descent and ascent device, marine submersible vehicle, metal structure, three-dimensional modeling, static strength calculation, internal stresses, safety factor.

Введение

Увеличение потребности современной промышленности в полезных ископаемых обуславливает интенсификацию процесса освоения мирового океана и диктует необходимость интенсивного проведения подводных работ с использованием различных технических средств. К числу таких средств относятся телеуправляемые необитаемые подводные комплексы (ТНПК), которые широко используются в области океанологических исследований и оценки запасов минеральных и биологических ресурсов океана [1].

Как показал обзор доступных источников проектированию и управлению самих подводных аппаратов уделено достаточно большое внимание [2-5], однако спускоподъемным устройствам (СПУ), как вспомогательному оборудованию, необоснованно придают меньшее значение. В то время как операции спуска и подъема аппарата сопряжены с большими рисками и являются самыми ответственными и определяющими сохранность самого аппарата и его работоспособность [6]. Поэтому эффективное и безопасное использование необитаемых аппаратов возможно лишь при наличии на судне-носителе специальных устройств, обеспечивающих вынос необитаемого аппарата за борт, его спуск под воду и также его подъем.

Для операций спуска и подъема подводных аппаратов наиболее распространены грузоподъемные устройства, расположенные непосредственно на борту судна. Самым распространённым типом СПУ является бортовой кран с поворотной стрелой, как, например, показано в работе [7] для спуска за борт аппарата REMUS 600. Судовой кран может быть использован только для небольших по весу и габаритам аппаратов. При значительном весе погружаемого аппарата его спуск под воду осуществляется через специальную шахту во избежание опасных значений крена судна, возникающих в процессе спускоподъемных операций с кормы и бортов судна. Пример такого решения по спуску аппарата за борт показан в работе [8]. В некоторых случаях для обеспечения дополнительной мобильности и управляемости подводного аппарата спуск и подъем подводного аппарата осуществляется с вынесенной за борт специальной платформы, как это показано в [9]. В последнее время все большее распространение получают беспилотные надводные устройства для спуска и подъема подводного аппарата, как правило, в виде катамарана [10], что позволяет освободить обеспечивающее судно от необходимости иметь грузовые краны, стрелы, лебедки, подъемники и другие подобные устройства. Наряду с традиционным грузоподъемным оборудованием, появляются и оригинальные технические решения. Так, в [11] предложен уникальный метод спуска и подъема больших подводных транспортных средств в специальном коконе, а в [12] предлагается осуществлять спуск под воду посредством надувной арочной конструкции.

Как показал обзор в настоящее время мировые исследования в области проектирования подводных аппаратов идут в направлении обеспечения их полной автономности и, как следствие, большинство существующих СПУ предназначены именно для автономных аппаратов, которые после спуска под воду становятся независимыми от судна-носителя и не связаны с ним механически. Однако в отечественной практике спускоподъемных операций наибольшее распространение получили телеуправляемые необитаемые подводные аппараты [13]. Для функционирования такого рода аппаратов необходимо наличие катушки с кабелем, посредством которого осуществляется питание и управление аппаратом. Таким образом, кабель-тросовая связь опускаемого неавтономного объекта с судном-носителем накладывает дополнительные условия и ограничения на конструкцию СПУ

[14]. Обзор конструктивных особенностей и условий эксплуатации спуско-подъемных устройств для подводных аппаратов дает основание полагать, что задача оптимизации конструкции СПУ для телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПК) является весьма актуальной.

Постановка задачи исследования

Целью данного исследования было разработать оптимальную конструкцию СПУ для спуска и подъема многофункционального телеуправляемого необитаемого подводного комплекса, предназначенного для выполнения геологоразведочных работ. Спускоподъемные работы проводятся посредством кабель-тросовой связи на неподвижном судне. При выборе конструкции СПУ определяющее значение имеет наличие кабель-тросовой связи опускаемого неавтономного объекта с судноносителем, размеры, форма и масса ТНПК и глубина его погружения, а также необходимость обеспечения работы при неподвижном или движущемся судноносителе. Разрабатываемое СПУ предназначено для спуска-подъема ТНПК массой 1200 кг. Спускоподъемные работы проводятся посредством кабель-тросовой связи на неподвижном судне. Учитывая вышеприведенные факторы, для проведения спускоподъемных операций могут быть использованы только судовые СПУ, классификация которых показана на рисунке 1. Использование выносных плавающих платформ или катамаранов ограничено спуском автономных аппаратов.

Проанализируем условия эксплуатации и область применимости различных типов судовых СПУ с целью обоснования выбора оптимальной конструкции СПУ для данного аппарата.

Шахтные СПУ основное применение находят при спуске-подъеме оборудования большой массы, так как спускоподъемные операции, проводимые с кормы и бортов судна, могут привести к значительному крену судна.

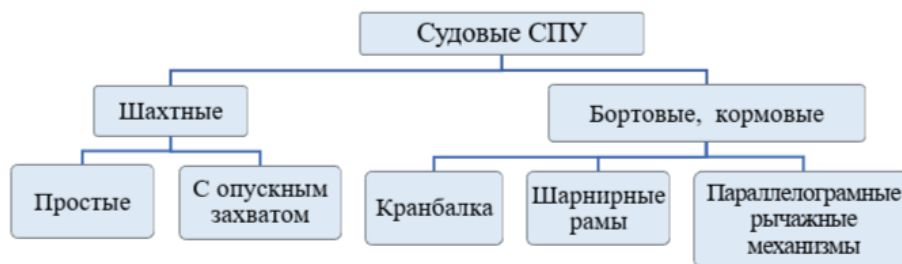


Рис. 1. Типы судовых СПУ

СПУ с **захватным параллелограммно-рычажным устройством** имеют достаточно сложную конструкцию и используются при жестких требованиях к устойчивости опускаемого объекта и сохранению его горизонтального положения. Поскольку подобных жестких требований к спуско-подъемному устройству для данного ТНПК не предъявляется, применение этого типа СПУ не оправдано.

Наибольшее распространение получили СПУ, выполненные в виде **кран-балки и шарнирной рамы**. В некоторых случаях шарнирно-закрепленные балки могут быть выполнены телескопическими. Преимуществами кран-балки являются: универсальность (может применяться для различных видов работ); большая зона охвата; компактность. К недостаткам можно отнести: относительно низкую грузоподъемность; большие перегибы грузонесущего кабеля; относительную сложность конструкции (по сравнению с СПУ с шарнирной рамой).

По сравнению с кран-балкой СПУ с шарнирной рамой обладают большей грузоподъемностью и в сочетании с более простой конструкцией обеспечивают более высокую надежность.

Таким образом, для выполнения спускоподъемных работ в заданных условиях эксплуатации наиболее обоснованным типом СПУ будет конструкция с шарнирной рамой. Схема предлагаемого СПУ и его элементный состав показаны на рисунке 2, где СПУ показан в рабочем положении, когда ТНПК находится за бортом судна.

Так как наиболее механически нагруженным элементом конструкции СПУ в процессе его эксплуатации является именно выносная рама, то от ее запаса прочности в большей мере будет зависеть надежность и безопасность работы всего СПУ, а также сохранность погружаемого аппарата. Поэтому оптимизация формы и размеров несущей рамы становится приоритетной задачей при проектировании любого СПУ такого типа. При этом выносная рама должна обеспечивать жесткость и прочность конструкции СПУ для отведения спускаемого оборудования на безопасное расстояние от корпуса судна во избежание ударов аппарата о борт судна. Вынос стрелы должен быть таким, чтобы при спускоподъемных операциях спускаемое оборудование не повреждалось. Выносная рама должна жестко крепиться к фундаменту на открытой палубе. С учетом всего вышесказанного задачей конструктивной оптимизации несущей рамы будет минимизация ее веса при обеспечении требуемого запаса прочности и свободного перемещения подводного аппарата под ней.

В СПУ с шарнирной рамой наиболее часто применяются рамы двух типов: А-образная и П-образная [15]. А-образной форма рамы с одной стороны позволяет несколько сократить ее общий вес, однако лишает некоторой степени свободы подвешенный на раме аппарат, что может привести к соударениям при качке или ветре. Применение А-образной формы оправдано только для малых по габаритам ТНПК. В нашем случае более целесообразным будет проектирование П-образной рамы, непосредственно на которой закреплен канифас-блок, как это показано на рисунке 2.

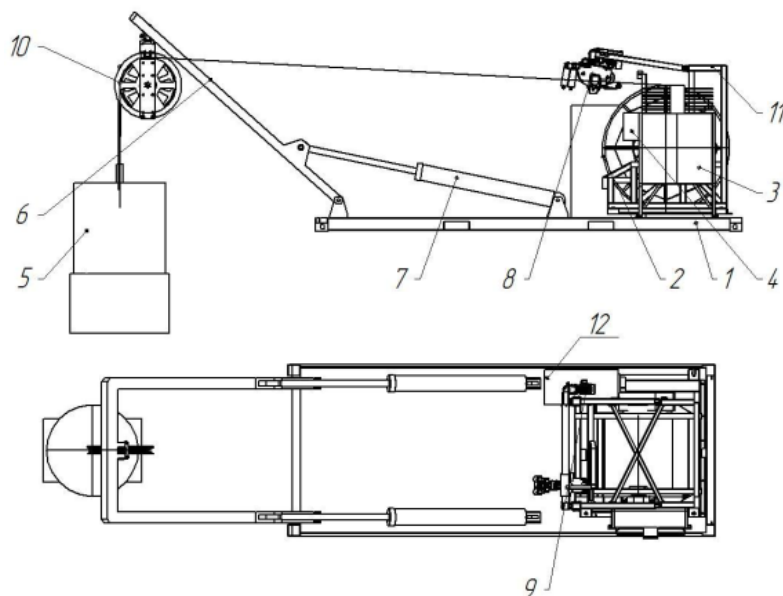


Рис.2. Исследуемая конструкция СПУ в рабочем положении.

1 - платформа; 2 - барабан; 3 - пульт управления; 4 - электрический шкаф; 5 - ТНПК; 6 - П-образная выносная рама (стрела); 7 - гидроцилиндры; 8 - кабелеукладчик; 9 - мотор-редуктор; 10 - канифас-блок; 11 - несущая рама; 12-гидростанция

Разрабатываемое СПУ должно обеспечивать удержание кабель-троса на безопасном расстоянии от борта судна в процессе спускоподъемных операций. В

данной компоновке СПУ это требование обеспечивается размерами П-образной стрелы и углом ее наклона по отношению к палубе при выносе ТНПК за борт до начала собственно спуска.

Материалы и методы

Для решения поставленной задачи конструктивной оптимизации необходимо выполнить анализ напряженно-деформированного состояния рамы в ее наиболее худшем сточки зрения нагруженности положении. При этом можно использовать универсальные системы трехмерного моделирования при условии наличия в них встроенного модуля прочностного расчета, такие как, например, Компас 3D, SolidWorks и др. Специализированные программные системы конечно-элементного анализа, такие как ANSYS, также могут быть использованы. Однако в современных реалиях все возрастающего санкционного давления со стороны западных стран применение зарубежных систем затруднено или вовсе невозможно. К слову сказать, среди отечественных разработок имеется ряд программ для автоматизированного прочностного расчета. Так в данной работе для решения задачи конструктивной оптимизации выносной рамы мы использовали приложение для прочностного расчета АПМ FEM, интегрированное в отечественную САПР Компас 3D. Выбор данной системы автоматизированного проектирования был обусловлен ее достаточно широким функционалом, в том числе и в области прочностного расчета, как это было нами показано в работах [16,17]. В Компас 3D производилось трехмерное твердотельное моделирование исследуемого объекта, а АПМ FEM выполнялось численное моделирование напряженно-деформированного состояния выносной рамы. Задача решалась в статической постановке.

П-образная рама представляет собой сварную конструкцию, состоящую из трех балок, двух продольных и одной поперечной. В центре поперечной балки присоединен канифас-блок, через который проходит трос. К концу троса присоединен ТНПК, масса которого равна 1200 кг. Все детали рамы выполнены из стали марки 40. В исходной конструкции рамы в качестве балок были приняты квадратные трубы по ГОСТ 8639-82, размеры поперечного сечения которых 100x100, а толщина стенок 6 мм. При этом габаритные размеры выносной рамы обусловлены размерами самого ТНПК и не подлежат изменению.

Конструктивную оптимизацию будем проводить для режима подъема ТНПК и выносе его за борт, так как вес ТНПК на воздухе значительно выше, чем в воде. Данный режим носит кратковременный характер, в связи с чем достаточно получить коэффициент запаса не менее 1,25. При этом масса рамы не должна превышать 250 кг. В свою очередь в процессе выноса ТНПК за борт из всех возможных положений выносной рамы наиболее жесткие условия по нагрузке будут в ее крайнем нижнем положении, когда рама примет рабочее положение за бортом судна (40 градусов к поверхности палубы). С этого момента, когда начнется спуск аппарата и до момента его входа в воду, когда уже начнет действовать выталкивающая сила, на раму будут действовать наибольшие нагрузки. Поэтому для нас наиболее показательным по прочности и надежности будет именно это состояние рамы. Если в этом режиме будет достигнут требуемый коэффициент надежности, то с уверенностью можно будет утверждать, что в других положениях рамы коэффициент надежности будет выше.

Для упрощения процесса моделирования было сделано несколько допущений. Так как основной задачей является определение напряжений и деформаций в П-образной раме, то имеет смысл не моделировать канифас-блок, обладающий достаточно сложной конструкцией, а заменить его проушиной, к которой будет присоединен трос. В качестве внешней нагрузки для рамы выступает вес ТНПК плюс масса канифас-блока, которые при моделировании были заменены кубом соответствующей массы. Фиксация рамы происходит по отверстиям, выполненным в нижней части продольных балок. Нижние отверстия служат для крепления рамы к палубе, а верхние

– для присоединения токов гидроцилиндров (см. Рис. 2). Тип реакции – зафиксированный шарнир.

Результаты исследования

На Рис. 3 приведены результаты численного моделирования внутренних напряжений, возникающих в исходной конструкции рамы в крайнем нижнем положении.

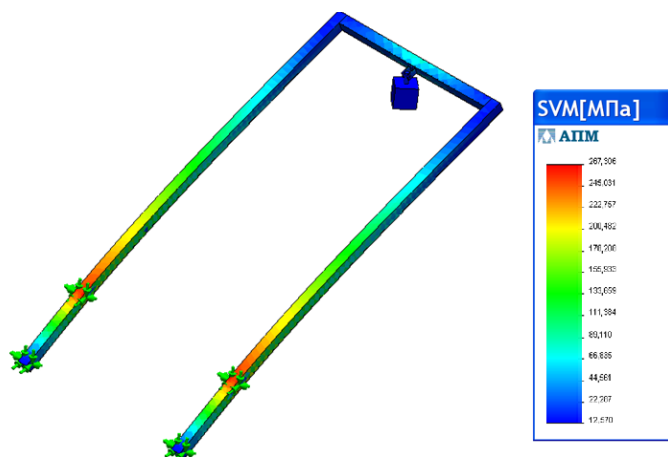


Рис. 3. Напряжения по Мизесу для исходной конструкции рамы

Для анализа надежности исходной конструкции также были определены внутренние деформации объекта и в качестве целевой функции - распределение коэффициента запаса прочности по конструкции объекта, показанного на рисунке 4.

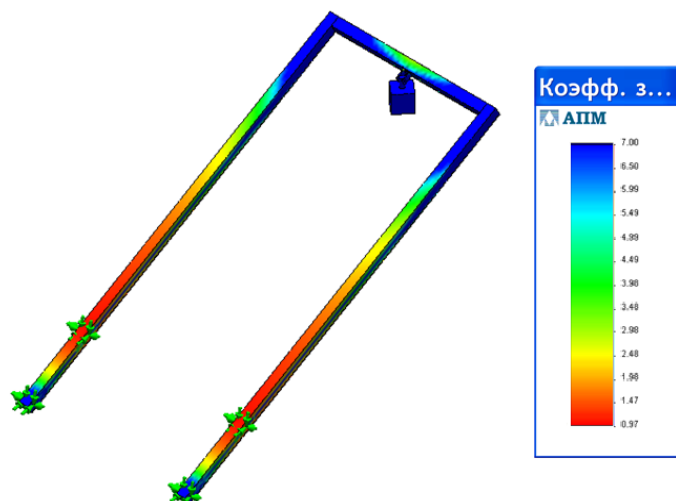


Рис. 4. Коэффициент запаса прочности для исходной конструкции рамы

Как видно из приведенных выше графиков для исходной модели рамы в крайнем положении коэффициент запаса прочности рамы составляет 0,97, что менее требуемого (1,25). Следовательно, возникает необходимость оптимизации ее конструкции. По результатам расчета можно утверждать, что максимальные

напряжения происходят в продольных балках в местах крепления штоков гидроцилиндров (на рисунке 3 эти области отмечены красным цветом), где в основном действует изгибающий момент. В то время как в поперечной балке напряжения минимальны, а значит ее конструкция подобрана верно и дальнейших изменений ее размеров и конфигурации не требуется.

С целью повышения запаса прочности рамы можно увеличить толщину стенки трубы продольных балок, оставив внешние размеры сечения трубы в 100 мм. В ходе нашей работы мы провели численное моделирование при различных толщинах стенки для анализа влияния данного параметра на прочностные характеристики рамы. Результаты расчета напряженно-деформированного состояния для квадратной трубы с толщиной стенки для 7, 8 и 9 мм представлены в таблице 1. В таблицу включены крайние максимальные значения по модели для напряжений, деформации и минимальное значение коэффициента запаса прочности.

Полученный в результате последовательного увеличения стенок трубы коэффициент запаса 1,3 при толщине 9 мм является вполне приемлемым, однако данная конструкция рамы значительно увеличит свой вес, что нежелательно с учетом заданных критериев оптимальности. Поэтому путь оптимизации конструкции в направлении увеличения толщины трубы можно считать нецелесообразным. Проанализировав полученные результаты силовых расчетов, можно заключить, что значительный вклад в напряжения, возникающие в раме, вносит изгибающий момент, поэтому с целью дальнейшей оптимизации было рассмотрено ещё одно конструктивное решение: в качестве продольных балок использовать трубы прямоугольного сечения по ГОСТ 8645-68, профиль которого размером 120x40 мм. Численные результаты проведенного расчета напряженно-деформированного состояния рамы для прямоугольной трубы с толщиной стенки 8 мм приведены в таблице 1. Так как такая конструкция рамы не обеспечила требуемый запас прочности, была также исследована рама с прямоугольным сечением 120x80 мм с толщиной стенки 8 мм и результаты данного расчёта также приведены в таблице 1. Следует отметить, что более логичное решение по увеличению только толщины стенки на прежнем сечении 120x40 не реализуемо в силу отсутствия толщины 9 мм для такого стандартного профиля. Как видно из таблицы 1, рама с увеличенным прямоугольным сечением 120x80 мм, с одной стороны, удовлетворяет по запасу прочности (1,35), но не удовлетворяет по массе (254 кг).

Полученные результаты показывают, что изменение конструкции путем смены формы профиля продольных балок рамы положительного эффекта также не оказывает. Так расчетный коэффициент запаса прочности рамы с прямоугольным сечением ниже (0,89), чем для квадратной трубы той же толщины стенки (1,2), а увеличение размера профиля ведет к излишней массе рамы. И поэтому такой путь конструктивной оптимизации также тупиковый.

В связи с несостоятельностью вышеприведенных приемов конструктивной оптимизации было предложено ещё одно конструктивное решение: для увеличения жесткости продольных балок в поперечном направлении на их верхние и нижние плоскости были добавлены ребра жесткости прямоугольного поперечного сечения. При этом были взяты начальные параметры профиля квадратной трубы 100x100 мм с толщиной стенки в 6 мм. На первом этапе была проанализирована конструкция с ребрами жесткости с сечением 25x40 мм. Как видно из таблицы 1 данная конструкция рамы дает избыточный коэффициент запаса прочности (1,95) при массе, значительно превышающей максимальную, поэтому было принято решение уменьшить размер сечения ребер жесткости на 20x40 мм. Длина ребер жесткости была неизменной и определялась областью значительных напряжений по длине балки. Проанализировав новые результаты силовых расчетов, приведенных в таблице 1, можно заключить, что данная конструкция П-рамы является оптимальной с точки зрения запаса прочности (1,5) и веса конструкции (232 кг). И действительно, при таком же значении массы

квадратной рамы с толщиной стенки 8 мм в 236 кг она дает коэффициент запаса прочности лишь 1,2, тогда как рама с ребрами жесткости обеспечивает 25% увеличение запаса прочности. Возможно дальнейшее повышение запаса прочности за счет увеличения габаритных размеров ребра жесткости, однако это приведет к утяжелению конструкции, увеличению расхода металла на ее изготовление и т.п., то есть нецелесообразно.

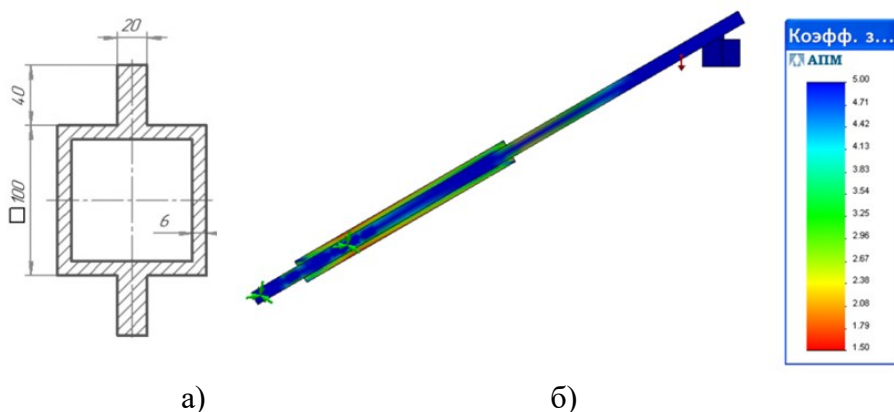


Рис. 5. Сечение профиля рамы с ребрами жесткости: а) и распределение запаса прочности для итоговой конструкции рамы: б)

Таблица 1

Результаты расчета прочностных и весовых характеристик рамы при изменении ее конструктивных параметров

Показатели	Внесение изменений в конструкцию							
	Изменение толщины стенки квадратной трубы 100x100мм, мм				Изменение формы профиля трубы на прямоугольный		Добавление ребер жесткости, мм	
	6,0	7,0	8,0	9,0	120x40x8	120x80x8	40x25	40x20
Напряжения по Мизесу, МПа	267	238	214	197	296	205	115	137
Внутренняя деформация объекта, $\times 10^{-4}$	10,9	9,7	8,7	8,0	12,04	9,36	3,05	4,89
Коэффициент запаса прочности	0,97	1,10	1,20	1,30	0,89	1,35	1,92	1,50
Масса рамы, кг	188	212	236	259	197	254	260	232

Таким образом, была предложена методика выполнения конструктивной оптимизации, блок-схема которой показана на рисунке 6. В данной методике можно выделить следующие этапы:

1. Постановка задачи конструктивной оптимизации.
2. Внесение изменений в конструкцию:
 - увеличение толщины стенки полой трубы;
 - изменение формы профиля трубы;
 - добавление дополнительных конструктивных элементов жесткости.
3. Проверка условий оптимизации по коэффициенту прочности и массе конструкции.

На втором этапе последовательно реализуются различные приемы изменения конструкции в указанном приоритете, т.е. увеличивают толщину стенки трубы до значимого увеличения веса конструкции. Если при достижении максимальной массы

в 250 кг, конструкция не показала требуемый уровень запаса прочности (больше 1,25) - в этом случае не удовлетворяются требуемые условия оптимизации - то переходят к следующему приему изменения конструкции.

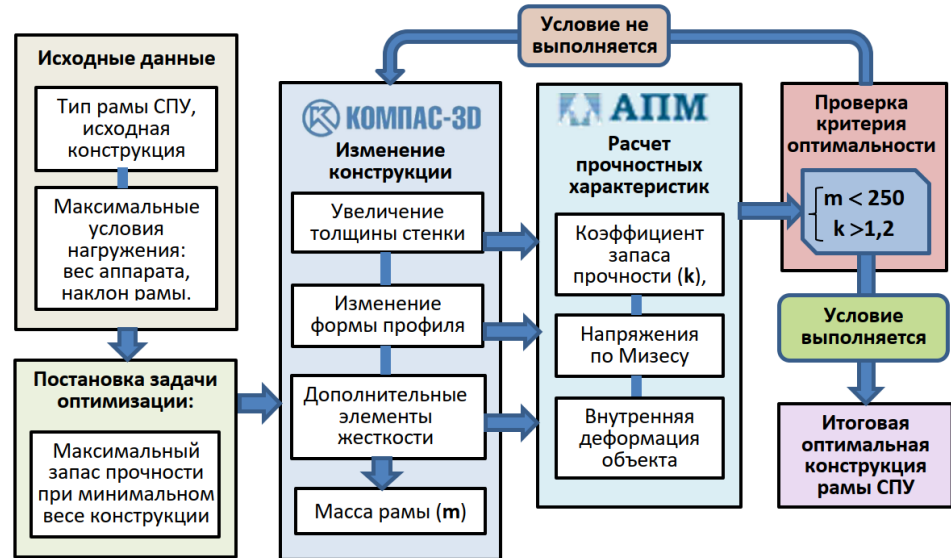


Рис. 6. Схема процесса оптимизации конструкции рамы СПУ

Предложенная методика конструктивной оптимизации может быть использована для любых металлических конструкций из профильных труб, для которых имеется стандартный номенклатурный ряд различной толщины стенки и формы профиля трубы. При этом описанная нами процедура конструктивной оптимизации может быть реализована в любой программе, имеющей функцию статического прочностного расчета, как например, вышеуказанные системы, такие как Компас 3D, SolidWorks, Inventor, ANSYS и др.

Заключение

В результате данной работы был проведен обзор основных конструктивных решений, применяемых в современной практике спускоподъемных операций для подводных аппаратов. Был выполнен сравнительный анализ применимости различных СПУ к поставленной задаче спуска и подъема телеуправляемого аппарата массой 1200 кг с борта судна. Был обоснован выбор судового СПУ с шарнирной рамой и предложена его конструкция, содержащая выносную раму П-образной формы. Для выносной рамы, как наиболее нагруженного элемента конструкции СПУ, была сформулирована задача конструктивной оптимизации и предложена методика ее выполнения. В ходе решения задачи оптимизации нами было выполнено численное моделирование напряженно-деформированного состояния выносной рамы для различных конструктивных параметров. В результате была достигнута оптимальная конструкция рамы, обеспечивающая максимальный коэффициент прочности при минимальной массе конструкции.

Список литературы

1. Данцевич И.М. Разработка малогабаритного телеуправляемого необитаемого подводного аппарата гибридной компоновки // Морские интеллектуальные технологии. - 2022. - № 3-1(57). - С. 147-152.
2. Данцевич И. М. Формализация задачи движения в продольно-поперечной плоскости телеуправляемых подводных аппаратов / И. М. Данцевич, М. Н. Лютикова, Ю. Ю. Метревели // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 2-4(52). – С. 168-177.
3. Глазков Г. В. Средства управления подводных аппаратов в зависимости от маршевой скорости их движения // Вестник науки. 2025. №1 (82).
4. Кожемякин И.В., Рождественский К.В., Рыжов В.А., Смольников А.В. Разработка автономных необитаемых подводных глайдеров // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. №3 (140).
5. Урваев И.У., Базыкин С.Н. Имитационное моделирование гидродинамических параметров подводного безэкипажного аппарата // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. №4 (50).
6. Власов В. Н., Гиниязов Н. Р. Судовые подъемно-опускные устройства // Научные проблемы водного транспорта. 2014. №38.
7. Rauch C G, Purcell M J T, Austin and G J Packard Ship of opportunity launch and recovery system for REMUS 600 AUV's // OCEANS. 2008. pp 1-4 doi: 10.1109/OCEANS.2008.5151832.
8. Кузнецов Г.П., Булдаков И.Н. Особенности размещения на судне шахты для спуска подводного аппарата // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. №3 (389).
9. Pinto V. H., Cruz N. A., Almeida R. M. and GoncÇalves C. F. ALARS - Automated Launch And Recovery System for AUVs //OCEANS. 2018. (MTS/IEEE Charleston). pp 1-6 doi: 10.1109/OCEANS.2018.8604544.
10. Sarda E I and Dhanak M R Launch and Recovery of an Autonomous Underwater Vehicle From a Station-Keeping USV // Journal of Oceanic Engineerin. 2019. Vol. 44 2 pp. 290-299. doi: 10.1109/JOE.2018.2867988.
11. Sharp K, Cronin D, Small D, Swanson R and Augustus T. A cocoon-based shipboard launch and recovery system for large autonomous underwater vehicles // MTS/IEEE Oceans. 2001. An Ocean Odyssey Conference Proceedings (IEEE Cat. No.01CH37295). Vol.1 pp 550-554 doi: 10.1109/OCEANS.2001.968780.
12. Boyd SD, Cavallaro PV, Cosmo AA, Cressman DE, Cutler III RF, Czepizak KM, Dooley RE, Galego RF, Kroger MJ, Moss GR, Muhitch JM Inventors. Inflatable launch and recovery system// United States patent. 2016. US 9,340,262
13. Sagalevich A.M. The Role of Submersibles in the Development of the Deep Ocean // Oceanology. - 2018. - Т. 58. - №6. - С. 918-922.
14. Бардачевский Н.Н., Беззуднов Е.Ю. Состояние и перспективы применения необитаемых подводных аппаратов в области гидрографических исследований и подводной навигации // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2013. №2.
15. Овчинников К.Д., Митюшин А.В., Франк М.О. Обоснование выбора спускоподъемного устройства для судна-носителя безэкипажных катеров // Вестник ИШ ДВФУ. 2024. №1 (58).
16. Быканова А.Ю. Некоторые вопросы конструкций спуско-подъемных устройств для подводных аппаратов // Технические науки – от теории к практике. 2014. №40.
17. Рыченкова А.Ю., Клименко Е.С., Бородина Л.Н. Геометрическое моделирование и оценка качества каркасной поверхности корпуса судна в САПР КОМПАС-3D // Научные проблемы водного транспорта. 2020. №62
18. Рыченкова А. Ю. Исследование качества каркасной поверхности при моделировании корпуса судна в зависимости от типа линий каркаса в САПР Компас 3D // Научные проблемы водного транспорта. – 2024. – № 80. – С. 56-65.

References

1. Dantsevich I.M. Razrabotka malogabaritnogo teleupravlyаемого neobitaемого podvodnogo apparata gibridnoi komponovki // Morskie intellektual'nye tekhnologii. - 2022. - № 3-1(57). - S. 147-152.

2. Dantsevich I. M. Formalizatsiya zadachi dvizheniya v prodol'no-poperechnoi ploskosti teleupravlyaemykh podvodnykh apparatov / I. M. Dantsevich, M. N. Lyutikova, YU. YU. Metreveli // Morskie intellektual'nye tekhnologii. – 2021. – № 2-4(52). – S. 168-177.
3. Glazkov G. V. Sredstva upravleniya podvodnykh apparatov v zavisimosti ot marshevoi skorosti ikh dvizheniya // Vestnik nauki. 2025. №1 (82).
4. Kozhemyakin I.V., Rozhdestvenskii K.V., Ryzhov V.A, Smol'nikov A.V. Razrabotka avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh glaidеров // Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki. 2013. №3 (140).
5. Urvaev I.U., Bazykin S.N. Imitatsionnoe modelirovanie gidrodinamicheskikh parametrov podvodnogo bezehkipazhnogo apparata // Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'. 2024. №4 (50).
6. Vlasov V. N., Giniyazov N. R. Sudovye pod"emno-opuskskiye ustroystva // Nauchnye problemy vodnogo transporta. 2014. №38.
7. Rauch C G, Purcell M J T, Austin and G J Packard Ship of opportunity launch and recovery system for REMUS 600 AUV's // OCEANS. 2008. pp 1-4 doi: 10.1109/OCEANS.2008.5151832.
8. Kuznetsov G.P, Buldakov I.N. Osobennosti razmeshcheniya na sudne shakhty dlya spuska podvodnogo apparata // Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra. 2019. №3 (389).
9. Pinto V. H., Cruz N. A., Almeida R. M. and Gonçalves C. F. ALARS - Automated Launch And Recovery System for AUVs //OCEANS. 2018. (MTS/IEEE Charleston). pp 1-6 doi: 10.1109/OCEANS.2018.8604544.
10. Sarda E I and Dhanak M R Launch and Recovery of an Autonomous Underwater Vehicle From a Station-Keeping USV // Journal of Oceanic Engineerin. 2019. Vol. 44 2 pp. 290-299. doi: 10.1109/JOE.2018.2867988.
11. Sharp K, Cronin D, Small D, Swanson R and Augustus T. A cocoon-based shipboard launch and recovery system for large autonomous underwater vehicles // MTS/IEEE Oceans. 2001. An Ocean Odyssey Conference Proceedings (IEEE Cat. No.01CH37295). Vol.1 pp 550-554 doi: 10.1109/OCEANS.2001.968780.
12. Boyd SD, Cavallaro PV, Cosmo AA, Cressman DE, Cutler III RF, Czepizak KM, Dooley RE, Galego RF, Kroger MJ, Moss GR, Muhitch JM Inventors. Inflatable launch and recovery system // United States patent. 2016. US 9,340,262
13. Sagalevich A.M. The Role of Submersibles in the Development of the Deep Ocean // Oceanology. - 2018. - T. 58. - №6. - C. 918-922.
14. Bardachevskii N.N., Bezsudnov E.YU. Sostoyanie i perspektivy primeneniya neobitaemykh podvodnykh apparatov v oblasti gidrograficheskikh issledovaniy i podvodnoi navigatsii // Interehkspo Geo-Sibir'. 2013. №2.
15. Ovchinnikov K.D., Mityushin A.V., Frank M.O. Obosnovanie vybora spuskopod"emnogo ustroystva dlya sudna-nositelya bezehkipazhnykh katerov // Vestnik ISH DVFU. 2024. №1 (58).
16. Bykanova A.YU. Nekotorye voprosy konstruksii spusko-pod"emnykh ustroystv dlya podvodnykh apparatov // Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike. 2014. №40.
17. Rychenkova A. YU., Klimenko E.S., Borodina L.N. Geometricheskoe modelirovanie i otsenka kachestva karkasnoi poverkhnosti korpusa sudna v SAPR KOMPAS-3D // Nauchnye problemy vodnogo transporta. 2020. №62.
19. Rychenkova A. YU. Issledovanie kachestva karkasnoi poverkhnosti pri modelirovanii korpusa sudna v zavisimosti ot tipa linii karkasa v SAPR Kompas 3D // Nauchnye problemy vodnogo transporta. – 2024. – № 80. – S. 56-65.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Рыченкова Анна Юрьевна, к.т.н, доцент кафедры «Механика и инженерная графика», Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф.Ушакова, 353918, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: anar4230@mail.ru

Anna Yu. Rychenkova, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department «Mechanics and Engineering Graphics», Admiral ushakov maritime state university, 93 Lenin Ave., Novorossiysk, 353918

Статья поступила в редакцию 24.06.2025; принята к публикации 02.12.2025; опубликована онлайн 20.03.2026. Received 24.06.2025; published online 20.03.2026.

УДК 629.5.031

DOI: 10.37890/jwt.vi86.674

Учёт требований виброакустики при проектировании судовых механических установок

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. Анализ источников и принятия мер по снижению шума судовых механических установок уже после постройки судна малоэффективна, поскольку мероприятия на готовом судне сводятся, в основном, к размещению дополнительного объема средств вибро- и звукоизоляции и звукопоглощения, не касаясь снижения шума в источнике. Их осуществление приводит к задержке сроков сдачи и удорожанию постройки судна в целом. Анализ затрат на работы по снижению шума на судах до требуемых величин показывает, что если удастся принять все необходимые меры еще на стадии проектирования, то затраты на противозумовой комплекс составят только одну треть от стоимости дополнительных мероприятий по снижению шума на уже построенном судне. Выяснено, что мероприятия по снижению шума и вибрации судовых механизмов наиболее эффективны и экономичны, если они приняты на стадии проектирования энергетической установки в процессе разработки схемы силовой установки, выбора механизмов и предъявлении акустических требований к поставщикам оборудования. Основное влияние на уровни вибрации и шума механизмов оказывают рабочий процесс, конструкция, технология изготовления, режим работы. Установлен факт, что для обеспечения санитарных норм шума на судах необходимо перечисленные мероприятия по снижению шума и вибрации в источнике сочетать с применением средств виброизоляции, вибродемпфирования, звукоизоляции и звукопоглощения.

Ключевые слова: проектирование, судовые механические установки, виброакустика, виброзащита, требование к основным узлам энергоустановки, уменьшение шумности.

Consideration of vibroacoustic requirements in the design of marine mechanical installations

Stanislav V. Terlych^{1,2}

ORCID: 0000-0002-6044-3087

¹*Kherson State Maritime Academy, Kherson, Russia;*

²*Admiral Ushakov State Maritime University, Novorossiysk, Russia*

Abstract: The analysis of sources and the adoption of measures to reduce the noise of shipboard mechanical installations after the construction of the vessel is ineffective, since the measures on the finished vessel are mainly reduced to the placement of additional vibration and sound insulation and sound absorption equipment, without addressing noise reduction in the source. Their implementation leads to a delay in delivery dates and an increase in the cost of building the vessel as a whole. An analysis of the cost of noise reduction on ships to the required values shows that if it is possible to take all necessary measures at the design stage, then the cost of an anti-noise complex will amount to only one third of the cost of additional noise reduction measures on an already built vessel. It has been found that measures to reduce noise and vibration of shipboard mechanisms are most effective and economical if they are adopted at the design stage of a power plant in the process of developing a power plant scheme, selecting mechanisms and presenting acoustic requirements to equipment suppliers. The vibration and noise levels of machinery are primarily influenced by the

operating process, design, manufacturing technology, and operating mode. It has been established that, to ensure sanitary noise standards on ships, the above-mentioned measures to reduce noise and vibration at the source must be combined with the use of vibration isolation, vibration damping, sound insulation, and sound absorption.

Keywords: design, marine mechanical installations, vibroacoustics, vibration protection, requirements for the main power plant components, and noise reduction.

Введение

Перспективы судостроения обычно связывают с повышением эффективности и надежности транспортных судов. В то же время, одна из главных задач в создании судов состоит в обеспечении максимальных удобств для экипажа, наибольшего комфорта для пассажиров, и на эту сторону проектирования конструкторам надо обращать самое пристальное внимание.

Одним из наиболее важных показателей комфорта является тишина. Шум и вибрация оказывают вредное воздействие на органы слуха и нервную систему человека. На судах акустическая обстановка осложняется тем, что люди длительное время испытывают указанное влияние дискомфорта.

Санитарные правила СП 2.5.3650-20 "Санитарно-эпидемиологические требования к отдельным видам транспорта и объектам транспортной инфраструктуры" регламентируют предельные уровни шума в машинных отделениях, в жилых и общественных помещениях судна. Поскольку основные источники шума связаны с работой судовых механизмов и систем, мероприятия, направленные на снижение шума и вибрации энергетической установки (ЭУ), должны обеспечивать установленные ограничения уровней шума (45...60 дБА), в каютах, салонах и других помещениях.

Методы и материалы исследования

Исследование особенностей проектирования судовых механических установок на ранних стадиях с учётом нормативных и отраслевых требований проводилось расчётно-теоретическим путём. Выяснено, что на образование шума и вибрации любого механизма расходуется часть энергии, подведенной к механизму.

Практика анализа источников и принятия мер по снижению шума ЭУ уже после постройки судна малоэффективна, поскольку мероприятия на готовом судне сводятся, в основном, к размещению дополнительного объема средств вибро- и звукоизоляции и звукопоглощения, не касаясь снижения шума в источнике. Их осуществление приводит к задержке сроков сдачи и удорожанию постройки судна в целом. Анализ затрат на работы по снижению шума на судах торгового флота, технического флота, промысловых добывающих, перерабатывающих и транспортно-рефрижераторных судах до требуемых величин [1] показывает, что если удастся принять все необходимые меры еще на стадии проектирования, то затраты на противозумовой комплекс составят только одну треть от стоимости дополнительных мероприятий по снижению шума на уже построенном судне.

При проектировании судовой ЭУ снижение шума вибрации достигается прежде всего, уменьшением интенсивности основных источников шума (механизмы, арматура, системы), а затем уже применением средств защиты от вибрации шума, подавления их на путях распространения. Ниже рассматриваются возможности и пути снижения вибрации и шума механизмов и оборудования судовых ЭУ в источнике.

Если считать, что энергия, подведенная к механизму за единицу времени равна $q = \frac{N_e}{\eta}$ (где N_e – эффективная мощность механизма, а η – эффективный коэффициент полезного действия), то общие потери энергии выразятся как $(1 - \eta)q = \frac{1-\eta}{\eta} N_e$, а энергия, которая расходуется на акустическое излучения (генерирование шума и вибрации), составит часть этих потерь

$$W_{ак} = k \frac{1 - \eta}{\eta} N_e, \quad (1)$$

где k – доля потерь энергии, реализуемая в виде шума и вибрации. Величина энергии, идущей на генерирование вибрации и шума, зависит прежде всего от типа механизма. На рис. 1 показаны спектральные характеристики излучаемой колебательной мощности для механических установок (судового дизеля, редуктора и судового гребного электродвигателя) различного типа [2].

Большое влияние на величину излучаемой колебательной мощности оказывают также конструкция механической установки, качество её изготовления и режим использования.

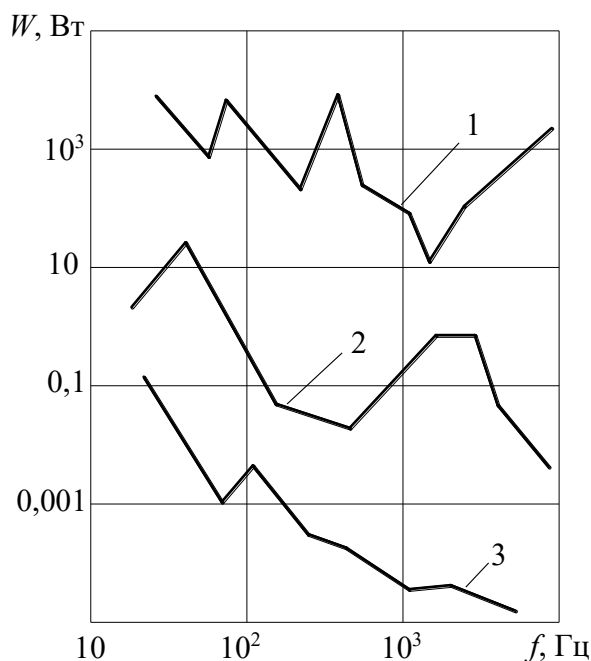


Рис. 1. Спектрограмма колебательной мощности механизмов с различными рабочими процессами (рисунок автора)
1 – судовой дизель; 2 – судовой редуктор; 3 – электродвигатель

Коэффициент k в зависимости (1) фактически отображает влияние всех основных факторов и может быть представлен как

$$k = k_{раб пр} \cdot k_{констр} \cdot k_{техн} \cdot k_{реж}, \quad (2)$$

где $k_{раб пр}$, $k_{констр}$, $k_{техн}$, $k_{реж}$ – соответственно коэффициенты влияния рабочего процесса, конструкции, технологии производства и режима работы.

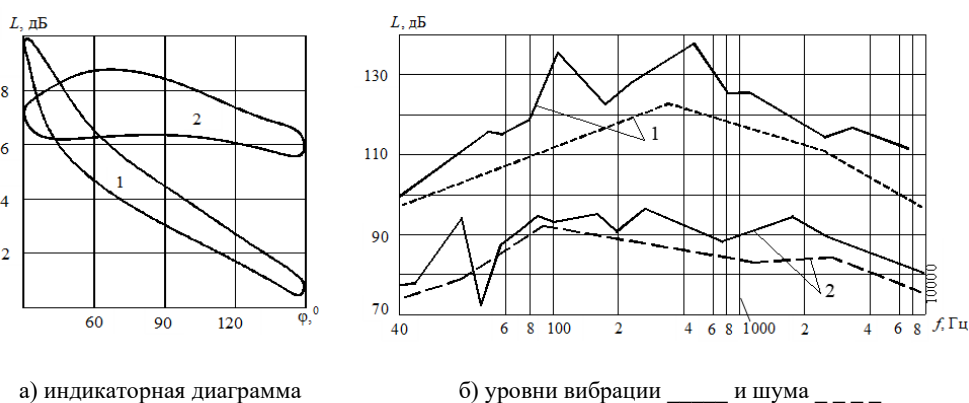
Из выражений (1) и (2) следует, что для снижения вибрации и шума судовой ЭУ необходимо на ранних стадиях проектирования стремиться к тому, чтобы мощность каждого механизма выбиралась минимальной и без лишних запасов N_e с целью работы механизмов на расчётном режиме (имели наименьшее значение $k_{реж}$ и наибольшее значение η), для того, чтобы каждый механизм имел малошумный рабочий процесс (наименьшее $k_{раб пр}$), рациональную конструкцию (наименьшее

констр) и был изготовлен на предприятии с высоким уровнем технологий (наименьшее $k_{\text{техн}}$).

Зависимость коэффициента k от основных конструктивных, технологических и энергетических параметров может быть определена аналитически, то в данном случае условное представление его в виде произведения отдельных факторов наиболее наглядно отражает фактическую взаимосвязь и последовательное влияние каждой стадии процесса на акустические характеристики. Результаты исследования представлены в относительном виде, то есть значения исследуемых параметров шума и вибрации, вызванные работой судовых механических установок, относились к величине соответствующего параметра для номинальной нагрузки соответствующего механизма. Сравнение виброхарактеристик механических установок проводилось для штатного варианта разработки схемы силовой установки, выбора механизмов и предъявлении акустических требований к поставщикам оборудования.

Результаты

Рабочий процесс механизма непосредственно определяет его шумообразование. Чем меньше динамичность процесса (выражающаяся в скорости нарастания нагрузки в течение рабочего цикла), чем меньше движущихся узлов и деталей требуется для действия механической установки, тем ниже ожидаемые уровни шума, и вибрации машины. Так, применение в поршневых двигателях цикла Стирлинга, имеющего плавный характер нарастания давления в цилиндре (рис. 2, а), позволяет получить шум и вибрацию, на 17...28 дБ ниже, чем у дизеля аналогичной мощности [3]. На рис. 2, б показаны спектры уровней шума и вибрации четырехцилиндрового двигателя Стирлинга 4-615 (Швеция) мощностью 160 кВт при частоте вращения 2400 об/мин коленчатого вала в сопоставлении с характеристиками быстроходного дизеля той же мощности.



1 – дизель; 2 – двигатель Стирлинга

Рис. 2. Сравнение характеристик дизеля и двигателя Стирлинга (рисунок автора)

По тем же причинам роторные машины всегда имеют лучшие виброшумовые характеристики по сравнению с поршневыми машинами. Поэтому предпочтительнее в равных условиях использовать в судовой ЭУ центробежные, насосы, винтовые компрессоры вместо поршневых механизмов того же назначения.

Зарубежными фирмами ведутся разработки оборудования с «бесшумным» рабочим процессом. В частности, российской фирмой «Осмос» разработаны [4] и серийно выпускаются судовые опреснительные установки, действующие на принципе обратного осмоса, где опресняется морская вода, прокачиваемая под высоким давлением через специальные спиральные мембраны. Производительность

стандартного ряда установок – от 0,5 до 450 м³ в сутки. Основными источниками шума в таких установках являются насосы. По сравнению с традиционной схемой опреснительной установки (где главные источники шума помимо насосов – испаритель и дроссельная арматура), новый ее тип должен иметь значительно лучшие акустические характеристики.

Конструкция оборудования оказывает большое влияние на шумовые характеристики. Конструктивными методами можно снизить динамичность рабочего процесса и в машинах традиционных типов. Так за счет применения косого языка улитки в центробежных насосах, косых пазов в электрических машинах удается резко уменьшить их вибрацию соответственно на лопастной и пазовой частотах. При неизменном рабочем процессе и одних и тех же энергетических параметрах различные конструкции механизмов значительно отличаются по уровням шума.

В статье рассмотрено влияние конструкции на примере запорной и дроссельно-регулирующей арматуры. Традиционные клапаны (типа седло – тарелка) являются интенсивными источниками шума, и вибрации в судовых трубопроводных системах, особенно при высоких скоростях течения среды, больших перепадах давления. Принципиально отличающаяся от них конструкция шаровых клапанов (рис. 3) позволяет обеспечить значительно лучшие акустические характеристики. В шаровых клапанах, используемых в качестве запорных (рис. 3, а), обеспечивается минимальное искажение потока (в полностью открытом положении клапана проточная часть его по гидравлическим и акустическим характеристикам эквивалентна прямому участку трубы). При применении шаровых клапанов в качестве дроссельно-регулирующих в проточной части клапана размещают перфорированные перегородки, которые обеспечивают многократное дросселирование потока при его частичном закрытии (рис. 3, б).

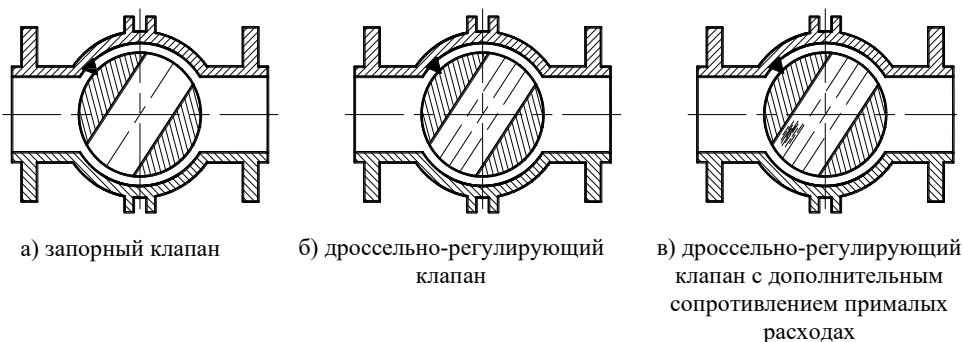


Рис. 3. Конструкция шаровых клапанов фирмы Valmet (рисунок автора)

Во избежание появления кавитации при очень малых расходах и усилении при этом вибрации и шума в клапане, конструктивно обеспечивается вязкостное дросселирование при протекании среды через узкие каналы (рис. 3, в). Приведенные конструкции клапана выпускаются зарубежными фирмами как для жидких, так и для газообразных сред. Они позволяют получить арматуру с меньшими уровнями вибрации, а кроме того, со значительным снижением воздушного и гидродинамического шума в судовой системе.

Дополнительное снижение шума шаровых клапанов фирмы «Valmet» (Финляндия), изображенных на рис. 3, в, по сравнению с рис. 3, а показано на рис. 4 [5].

Технологическая культура производства также оказывает большое влияние на вибрацию и шум судовых механизмов. Прежде всего это относится к точности обработки рабочих органов (лопасти насосов и вентиляторов), сопрягаемых деталей

(кинематическая пара шейка вала – подшипник, зубчатое зацепление, зазоры в дроссельно-регулирующих устройствах) и к балансировке роторных механизмов.

В практике мирового судового машиностроения принята качественная оценка виброактивности механизма по классам, отличающимся по уровням вибрационной скорости на 6 дБ, т. е. в 2 раза [6-8]. При хорошей точности изготовления и балансировке механизм отличается «мягкой» работой, что соответствует вибрационной скорости 0,25...0,5 мм/с. Отличные акустические качества машины наблюдаются при вибрационной скорости меньше 0,25 мм/с [9-11].

В исследовании оценена необходимая точность обработки узлов машины на примере некруглости (эллипсность, овальность) шейки ротора, которая вызывает вибрацию на удвоенной частоте вращения $n_{ном}$. Если отклонение в точности обработки шейки (разность между большой и малой осями эллипса) составляет Δ , то амплитуда вибрационной скорости, сообщаемая подшипнику, равна

$$v = 2\omega \frac{\Delta}{4} = 2(2\pi f) \frac{\Delta}{4} = \pi f \Delta,$$

откуда

$$\Delta = \frac{v}{\pi f}.$$

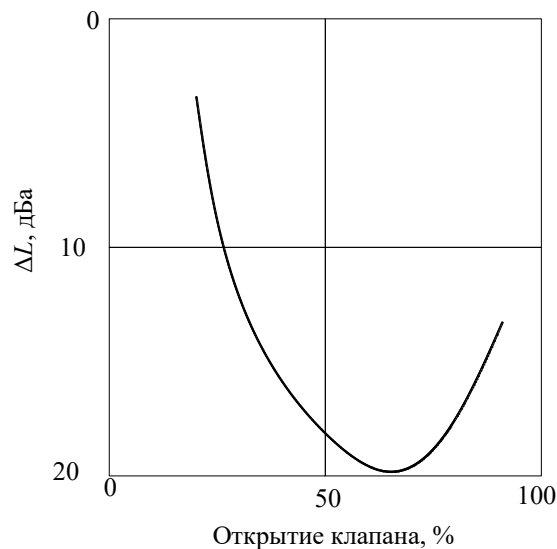


Рис. 4. Снижение гидродинамического шума клапана (рис. 3, в) по сравнению с обычным шаровым клапаном (рис. 3, а) (рисунок автора)

При частоте вращения ротора 50 Гц для обеспечения «мягкой» работы машины отклонение в диаметре шейки не должно превышать 0,0016 мм, т. е. обработка должна вестись на станках высших классов точности.

Все вышеперечисленные факторы учитываются при проектировании и изготовлении машин для обеспечения санитарных норм по шуму и вибрации в судовых помещениях.

Режим работы судового механизма, определяемый, во многом, уже на стадии проектирования ЭУ, является очень важным фактором, влияющим на фактические уровни шума и вибрации.

При отклонении режима работы механизма от номинального изменение шума и вибрации определяется в общем виде как

$$\Delta L = L - L_{НОМ} = a_1 \lg \frac{N}{N_{НОМ}} + a_2 \lg \frac{n}{n_{НОМ}},$$

где $L, L_{НОМ}$ – уровни вибрации (шума); $N, N_{НОМ}$ – мощность механизма на текущем и номинальном уровне соответственно; $n, n_{НОМ}$ – частота вращения механизма на текущем и номинальном режиме соответственно; a_1 и a_2 – коэффициенты. Для конкретных типов механизмов (насосов, вентиляторов) в зависимости от основных энергетических параметров эта величина будет равна

$$\Delta L = a_1 \lg \frac{Q}{Q_{НОМ}} + a_2 \frac{H}{H_{НОМ}} + a_3 \frac{n}{n_{НОМ}};$$

где Q и H – подача и напор насоса (вентилятора).

Относительная величина коэффициентов a_1, a_2, a_3 может сильно влиять на выбор оптимального способа регулирования режима работы механизма с учетом акустических параметров.

В качестве примера рассмотрены способы регулирования подачи насоса забортной воды в зависимости от ее температуры. При плавании судна в холодных водах для снижения подачи насоса в системе охлаждения нужно либо прикрыть клапан на трубопроводе (изменить характеристику сети), либо уменьшить частоту вращения насоса при постоянной характеристике сети. Соответствующие режимы даны на графике расходной характеристики насоса (рис. 5, в).

При работе насоса со сниженной подачей и неизменной частотой вращения (точка 2) уровни вибрации увеличиваются пропорционально третьей степени величины отклонения подачи от номинальной. При уменьшении подачи насоса за счет регулирования частоты вращения (точка 3) уровни вибрации и шума убывают пропорционально квадрату частоты вращения. Таким образом, разница в уровнях вибрации и шума насоса при различных способах регулирования уже при подаче 75–80% от номинальной составит 8...10 дБ (рис. 5, 6).

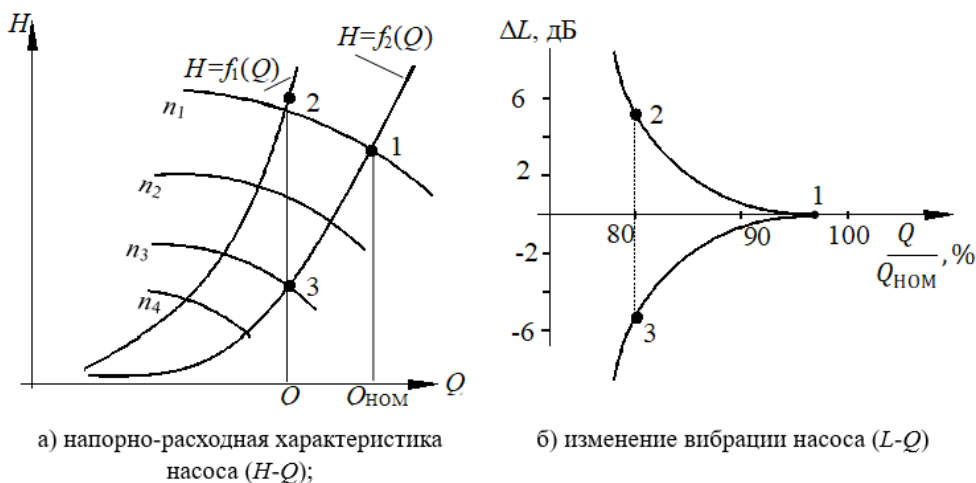
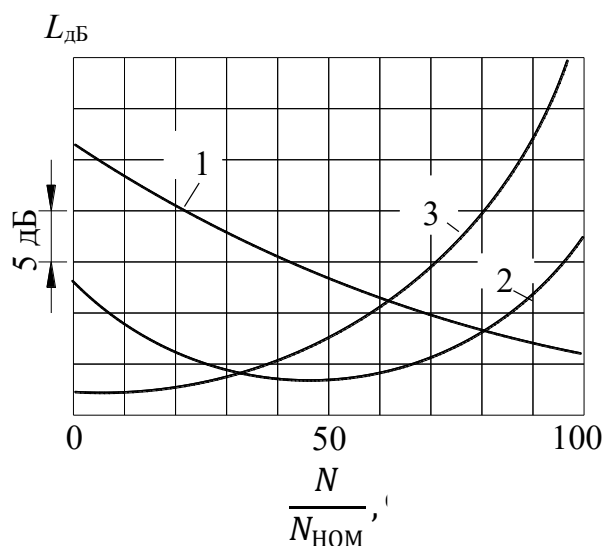


Рис. 5. Изменение параметров судового центробежного насоса при различных способах регулирования (рисунок автора)

Обсуждение результатов

Работа судовых механизмов на неспецификационном режиме, отличающемся от номинального по тепловой нагрузке и частоте вращения, как правило, связана с повышением механической вибрации. Это объясняется тем, что при динамической балансировке механизма корректирующие грузы устанавливаются обычно в двух плоскостях, уравнивая при этом сложную пространственную систему сил, порождаемую анизотропностью плотности материала и жесткости конструкции, а также неточностью изготовления.

При изменении нагрузки и соответственно теплового режима пространственная система сил изменяется, меняя значение и направление результирующего вектора сил, а величина и место установки грузов остаются неизменными, соответствующими тому режиму, на котором проводилась балансировка. На рис. 6 приведены графики типового изменения вибрации механизма на частоте вращения в зависимости от нагрузки при различных режимах балансировки. Для достижения оптимальных акустических характеристик судовой ЭУ необходимо на стадии проектирования в технических заданиях на проектирование механизмов помимо ограничения максимальных уровней вибрации и шума определять режим балансировки и акустической настройки машины, в качестве которого целесообразно выбирать режим длительной эксплуатации.



1 – балансировка проведена при нагрузке $Ne = 100\%$; 2 – то же при $Ne = 50\%$;
3 – то же при $Ne = 20\%$.

Рис. 6. Характер изменения вибрации судового механизма на частоте вращения в зависимости от нагрузки (рисунок автора)

Заключение

1. Мероприятия по снижению шума и вибрации судовых механизмов наиболее эффективны и экономичны, если они приняты на стадии проектирования энергетической установки в процессе разработки схемы силовой установки, выбора механизмов и предъявлении акустических требований к поставщикам оборудования.

2. Основное влияние на уровни вибрации и шума механизмов оказывают рабочий процесс, конструкция, технология изготовления, режим работы.

3. Для обеспечения санитарных норм шума на судах необходимо перечисленные мероприятия по снижению шума и вибрации в источнике сочетать с применением средств виброизоляции, вибродемпфирования, звукоизоляции и звукопоглощения.

Список литературы

1. Титова Ю.Ф., Крахмалева О.А., Бабанин Н.В., Яковлев А.С., Яковлев Н.С. Экспериментальная установка для определения амплитудно-частотных характеристик эластомернометаллических виброизоляторов, применяемых в судостроении, Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 2 часть 1, С. 121—126. DOI: 10.37220/MIT.2025.68.2.013
2. Yuliyana F. Titova, Stanislav N. Yakovlev, Dmitry N. Polyakhov, Olga A. Krakhmaleva, Aleksandr N. Andreev, Experimental determination of the natural vibration frequency of elastomeric vibration isolators used in shipbuilding, Marine intellectual technologies. 2024. № 3 part 1, P. 149—155. DOI: 10.37220/MIT.2024.65.3.036.
3. Хрунков С.Н., Кузнецов Ю.П., Кузьмин Н.А., Молев Ю.И., Миронов А.А., Крайнов А.А. Оптимизация параметров двигателей силовых установок экранопланов, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 3 часть 1, С. 138—142. DOI: 10.37220/MIT.2024.65.3.034.
4. Чукарев, А. Г. Использование вторичных энергоресурсов в опреснительных установках судна / А. Г. Чукарев, Б. Б. Заварзин, Р. В. Рюмин. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2018. – № 26 (212). – С. 60-62. – URL: <https://moluch.ru/archive/212/51826>.
5. Каталог фирмы Valmet: официальный сайт <https://www.valmet.com/> (дата обращения: 19.02.2025). - Текст : электронный.
6. Принципы диагностики технического состояния оборудования по параметрам вибрации // Технический отчет, Санкт-Петербург, ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова», 2009.
7. Гольдин, А. С. Вибрация роторных машин [Текст] / А. С. Гольдин. – М.: Машиностроение, 2000. – 344 с.
8. Балицкий Ф.Я., Барков А.В., Баркова Н.А. Неразрушаемый контроль: Справочник. – М., «Машиностроение». 2005. – Т. 7 - Книга 2 – 829 с.
9. NR266 Требования к проверке материалов и оборудования для классификации судов и морских сооружений [Электронный ресурс]. – режим доступа: <https://group.bureauveritas.com/> (дата обращения: 15 сентября 2025 г.).
10. Правила классификации и постройки морских судов, часть VII «Механические установки». – СПб: РМРС. – 2024. – 108 с.
11. NR266 Требования к проверке материалов и оборудования для классификации судов и морских сооружений [Электронный ресурс]. – режим доступа: <https://group.bureauveritas.com/> (дата обращения: 15 сентября 2025 г.).

References

1. Yuliyana F. Titova, Olga A. Krakhmaleva, Nikolaj V. Babanin, Alexey S. Yakovlev, Nikolay S. Yakovlev Experimental equipment for determining the amplitude-frequency characteristics of elastomer-metal vibration isolators used in shipbuilding. Marine intellectual technologies. 2025. № 2 part 1, P. 121—126. DOI: 10.37220/MIT.2025.68.2.013
2. Yuliyana F. Titova, Stanislav N. Yakovlev, Dmitry N. Polyakhov, Olga A. Krakhmaleva, Aleksandr N. Andreev, Experimental determination of the natural vibration frequency of elastomeric vibration isolators used in shipbuilding, Marine intellectual technologies. 2024. № 3 part 1, P. 149—155. DOI: 10.37220/MIT.2024.65.3.036.
3. Sergey N. Khrunkov, Yuriy P. Kuznetsov, Nikolai A. Kuzmin, Yuriy I. Molev, Anatolii A. Mironov, Artem A. Krainov, Optimization of engine parameters for power plants on acrofoil boats, Marine intellectual technologies. 2024. № 3 part 1, P. 138—142. DOI: 10.37220/MIT.2024.65.3.034/

4. Chukarev, A. G. Use of secondary energy resources in ship desalination plants / A. G. Chukarev, B. B. Zavarzin, R. V. Ryumin. — Text : immediate // Young Scientist. – 2018. – No. 26 (212). – Pp. 60-62. – URL: <https://moluch.ru/archive/212/51>
5. Valmet Company Catalog: Official Website <https://www.valmet.com/> (Accessed: 19.02.2025). – Text: electronic.
6. Principles of Diagnostics of the Technical Condition of Equipment by Vibration Parameters // Technical Report, St. Petersburg, FSUE TsNII im. akad. A.N. Krylova, 2009.
7. Goldin, A. S. Vibration of Rotary Machines [Text] / A. S. Goldin. – Moscow: Mashinostroenie, 2000. – 344 p.
8. Balitsky F.Ya., Barkov A.V., Barkova N.A. Non-Destructive Testing: Handbook. – M., Mashinostroenie. 2005. – Vol. 7 – Book 2 – 829 p.
9. NR266 Requirements for the Inspection of Materials and Equipment for the Classification of Ships and Marine Structures [Electronic resource]. – access mode: <https://group.bureauveritas.com/> (accessed on September 15, 2025).
10. Rules for the Classification and Construction of Marine Vessels, Part VII "Mechanical Installations". - St. Petersburg: RMRS. - 2024. - 108 p.
11. NR266 Requirements for the Inspection of Materials and Equipment for the Classification of Vessels and Marine Structures [Electronic resource]. - access mode: <https://group.bureauveritas.com/> (accessed on September 15, 2025).

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 04.11.2025; принята к публикации 22.01.2026; опубликована онлайн 20.03.2026. Received 04.11.2025; published online 20.03.2026.

УДК 629.576

DOI: 10.37890/jwt.vi86.685

Проблемы классификации скоростных амфибийных судов комбинированного типа

А.В. Февральских

ORCID 0000-0002-5959-7994

Е.М. Грамузов

Ю.А. Карпиков

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г.
Нижний Новгород, Россия*

Аннотация. За более чем вековую историю развития судов с аэродинамическим поддержанием появилось множество различных архитектурно-конструктивных типов: от глиссирующих судов на воздушной подушке (СВП) до тяжелых экранопланов и судов, сочетающих экранное крыло с воздушной подушкой. Одним из ключевых преимуществ использования аэродинамического поддержания является возможность обеспечения амфибийности, то есть движения судна и над водой, и над твердой поверхностью. Тенденция комбинации принципов движения на воздушной подушке с использованием положительного влияния экранного эффекта получила активное развитие в последние десятилетия и связана она, главным образом, со стремлением достичь высокой скорости крейсерского движения и грузоподъемности при умеренной энерговооруженности. Проблема классификации судов с аэродинамическим поддержанием внутреннего и смешанного плавания, использующих комбинацию различных принципов движения (на воздушной подушке и под действием экранного эффекта), исходит из необходимости разработки научно обоснованных подходов к их проектированию и освидетельствованию, включая требования к конструкции и методам расчета с учетом требований по безопасности эксплуатации. В работе приведен обзор архитектурно-конструктивных типов СВП, экранопланов и судов, комбинирующих движение на воздушной подушке с использованием положительного влияния экранного эффекта, предложена классификация скоростных амфибийных судов и некоторые решения, направленные на разработку правил постройки скоростных амфибийных судов, которые не учитываются в действующих правилах постройки СВП и экранопланов.

Ключевые слова: скоростное амфибийное судно, судно на воздушной подушке, экраноплан, классификация судов

Classification of high-speed amphibious vessels of mixed type

Andrey V. Fevral'skikh

ORCID 0000-0002-5959-7994

Eugeny M. Gramuzov

Yuriy A. Karpikov

ORCID: 0009-0003-6669-8958

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Over more than century-long history of aerodynamically assisted vessels, numerous architectural and design types have emerged: from planing hovercraft (HVS) to heavy ground effect craft and vessels combining a ground effect wing with an air cushion. One of the key advantages of using aerodynamic assisted vessels is the ability to provide amphibious capabilities, enabling movement on shallows and ice, and the ability to independently reach unimproved shores. The trend of combining hovercraft propulsion principles with the positive effects of the ground effect has rapidly developed in recent decades and is primarily driven by the desire to achieve high cruising speeds and cargo

capacity with moderate power-to-weight ratios. The problem of classifying aerodynamically assisted vessels using a combination of different propulsion principles stems from the necessity to develop scientific approaches to their design, including design requirements and calculation methods considering operational safety requirements. The paper provides an overview of the architectural and structural types of hovercraft, wing-in-ground effect vehicles, and vessels combining air cushion movement with the use of positive influence of ground effect, and proposes a classification of high-speed amphibious vessels, and some solutions aimed at developing rules for the construction of high-speed amphibious vessels that are not taken into account in the current rules considering construction of hovercraft and wing-in-ground effect vehicles.

Keywords: high-speed amphibious vessel, air-cushion vehicle, wing-in-ground effect vehicle, vessel classification

Введение

В соответствии с определениями Российского Классификационного Общества [1]:

– СВП – судно на воздушной подушке (air-cushion vehicle), скеговое или амфибийное, т.е. судно, вес которого или его значительная часть как при движении, так и без движения может поддерживаться постоянно нагнетаемой воздушной подушкой, эффективность которой зависит от близости поверхности, над которой находится судно;

– экраноплан – многорежимное судно на динамической воздушной подушке, которое в своем основном эксплуатационном режиме летит с использованием «экранного эффекта» над водной или иной поверхностью, без постоянного контакта с ней, и поддерживается в воздухе, главным образом, аэродинамической подъемной силой, генерируемой на воздушном крыле (крыльях), корпусе, или их частях (аэродинамическая несущая система), которые предназначены для использования действия «экранного эффекта»;

– экранный эффект — создание динамической воздушной подушки, образуемой под аэродинамической несущей системой экраноплана путем нагнетания в эту область воздуха набегающим потоком, что при разрежении над верхней плоскостью воздушных крыльев создает повышенное давление под их нижней плоскостью, возможное на высотах от нескольких сантиметров до нескольких метров над водной или иной поверхностью, когда возмущения, приводящие к росту давления, достигают земли (воды), отражаются и успевают дойти до крыльев.

Основным документом, регламентирующим классификацию скоростных амфибийных судов, является документ под названием «Правила классификации и постройки судов» [2]. Классификация судов на воздушной подушке, согласно этому документу, осуществляется в зависимости от ветро-волнового режима бассейна эксплуатации. Действующие Правила классификации и постройки экранопланов распространяются на суда водоизмещением до 50 тонн, которые эксплуатируются в навигационный период в бассейнах разрядов «Л», «Р», «О», «М» и которые в зависимости от режима волнения и загруженности судоходных линий могут изменять режимы движения: плавание, глиссирование, экранный полет [2]. Важно отметить, что режим движения на воздушной подушке принципиально отличается от режима экранного полета главным образом ввиду того, что судно на воздушной подушке проявляет амфибийные свойства «на стопе», а экраноплан становится «амфибийным» только после взлета. Это отличие влияет на вид зависимостей сопротивления движению этих судов от числа Фруда [3-7]. «Правила классификации и постройки судов» в действующей редакции не распространяются на суда, сочетающие в аэрогидродинамической компоновке воздушную подушку и экранное крыло, хотя, их освидетельствование допускается при условии предоставления дополнительных данных – результатов экспериментальных или расчетных исследований. Кроме того, применительно к движению в режиме экранного полета в действующих «Правилах»

отсутствует понятие критериев устойчивости движения, в том числе – общеупотребимых критериев продольной статической устойчивости [8; 9], впервые опубликованных Иродовым Р.Д. ещё в 1970 году.

Эти обстоятельства являются достаточным основанием для пересмотра классификации скоростных амфибийных судов и разработки правил постройки скоростных амфибийных судов комбинированного типа.

Архитектурно-конструктивные типы судов на воздушной подушке

В настоящее время не существует единой общепринятой классификации архитектурно-конструктивных типов судов на воздушной подушке. В работе Бенуа Ю.Ю. [10] рассматривается классификация судов по принципу взаимодействия с водной средой в процессе движения: различают суда с полным отрывом от воды, с частичным отрывом от воды и суда без отрыва от воды. Данная классификация приобретает дополнительную актуальность в связи с развитием скоростных амфибийных судов комбинированного типа, поскольку такие суда могут двигаться как с полным отрывом от воды на режиме экранного полета, так и с частичным отрывом или без отрыва от воды на режиме хода на воздушной подушке, в зависимости от транспортной задачи. Также в работе [10] предложена классификация 5 типов СВП, различающихся по схеме создания воздушной подушки:

1. СВП с общей подкупольной камерой.
2. СВП с подачей воздуха через кольцевые сопла, расположенные по периметру воздушной подушки.
3. СВП с лабиринтным уплотнением циркулирующего воздушного потока.
4. СВП с воздушной смазкой – тонким слоем воздуха между днищем и водной поверхностью.
5. СВП с рубкой в виде экранного крыла, использующего экранный эффект для частичной разгрузки.

В качестве примера судна пятого типа из вышеперечисленных указан аппарат Т.П. Каарио (рисунок 1), предложенный в 1935 году. Пример аппарата Т.П. Каарио показывает, что идея создания скоростных амфибийных судов комбинированного типа возникла ещё на заре развития судов с аэродинамическим поддержанием.

В конструкциях известных скоростных амфибийных судов комбинированного типа воздушная подушка создается одним из двух способов: 1) с помощью отдельного вентилятора (СВП типа 1 по классификации Бенуа Ю.Ю. [10]); 2) с помощью маршево-поддувного устройства. ВП второго типа принято называть «динамической», а ВП первого типа можно назвать «статической», имея в виду, что парение на такой подушке возможно без движения судна, т.е. «на стопе».

В работе [11] достаточно много внимания уделено классификации гибкого ограждения воздушной подушки. Выделены следующие классификационные признаки:

1. Место расположения гибкого ограждения под днищем.
2. Схема формирования воздушной подушки.
3. Применение механизации управления гибким ограждением.
4. Особенности применения основных конструктивных элементов ограждения.

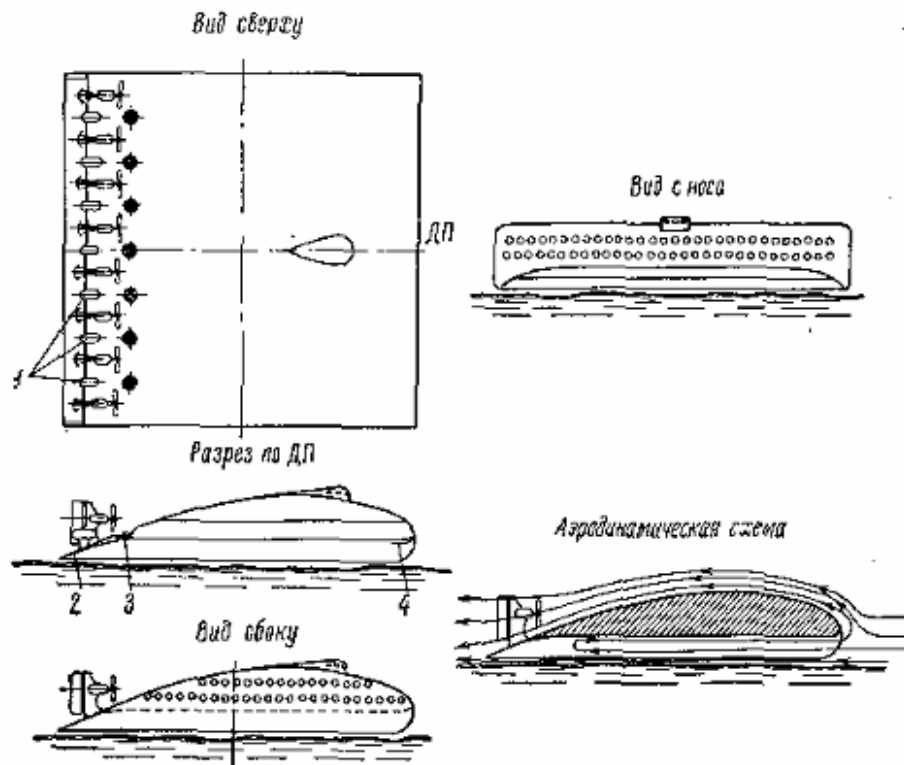


Рис. 1. Судно на воздушной подушке с рубкой в виде экранного крыла Т.П. Каарио [10]: 1 – маршевые двигатели, 2 – кормовое ограждение, 3 – нагнетающие вентиляторы, 4 – носовое ограждение

Предложены классификации в зависимости от схемы формирования воздушной подушки и в зависимости от применения основных конструктивных элементов. Несмотря на высокую информативность материала работы [11], важно отметить, что в известных конструкциях скоростных амфибийных судов комбинированного типа используется баллонетное или скеговое ограждение [12], поскольку такой тип ограждения представляется более удобным в исполнении (по сравнению с сегментированной юбкой) и позволяет обеспечивать наименьшее значение аэродинамического сопротивления движению судна и наименьшее влияние аэроупругости на устойчивость движения. Однако, вопрос применения других типов ограждения в конструкции скоростных амфибийных судов комбинированного типа остается открытым.

Также открытым остается вопрос и о возможности учета классификационных признаков, приведенных в работе [11], в действующих правилах классификации и постройки судов, однако, в пользу актуальности данного вопроса свидетельствует, в том числе, факт отсутствия в правилах положений, определяющих требования по устойчивости движения СВП, на которую, в первую очередь, влияет схема создания воздушной подушки и конструкция ограждения. Устойчивость движения СВП, в соответствии с положениями работы [13], сформулирована в виде требования, выраженного неравенством (1).

$$x_G > x_p \quad (1)$$

x_G – абсцисса центра тяжести, x_p – абсцисса центра давления, отсчитанные в диаметральной плоскости в направлении от носа в корму судна.

На практике использование неравенства (1) в классификационной деятельности и освидетельствовании СВП не представляется нерешаемой задачей, поскольку положение центра давления при равномерном распределении давления в области воздушной подушки может быть определено как геометрический центр воздушной подушки в плане, о чем указано и в работе [13].

Другой проблемой освидетельствования СВП является достоверное определение аэрогидродинамического сопротивления движению на различных режимах волнения. Разработка аналитических подходов к решению этой задачи для каждой схемы воздушной подушки представляется задачей чрезмерно трудоемкой, однако в качестве современного универсального метода определения сопротивления движению СВП можно рассматривать методы численного моделирования гидродинамики на основе решения уравнений Навье-Стокса, реализованные в пакетах программ цифровой поддержки процессов жизненного цикла [12; 14]. В связи с развитием импортозамещения, на смену пакетам программ Star CCM+ и Ansys в практике отечественного судостроения приходит отечественный аналог FlowVision, который позволяет решать задачи моделирования корабельной гидродинамики [15] при значительно меньших требованиях к вычислительной технике за счет использования квази-однофазного подхода.

Архитектурно-конструктивные типы экранопланов

Наиболее распространенный тип классификации экранопланов опирается на аэродинамическую схему компоновки [4;5;12]. Различают:

- самолетную схему;
- схему утка;
- схему тандем;
- схему «летающее крыло»;
- схему «составное крыло».

В соответствии с классификацией Международной морской организации, по возможностям движения относительно экранной поверхности различают экранопланы следующих типов [16]:

– Тип А: экраноплан, предназначенный для эксплуатации только вблизи экранной поверхности. Конструкция такого судна должна исключать возможность движения над экраном на высоте, превышающей значение высоты h_g : это значения высоты величина коэффициента подъемной силы составляет 1,1 величины коэффициента подъемной силы вне влияния экрана (при $h \rightarrow \infty$);

– Тип В: экраноплан, предназначенный для эксплуатации в условиях влияния экранного эффекта и способный выходить за пределы влияния экранного эффекта на высоту, не более 150 м для обхода препятствий;

– Тип С: аналогичен экраноплану типа В и отличающийся возможностью движения на высоте более 150 м над экраном.

В работе [12] предложена следующая классификация экранопланов по взлетной массе: легкие (до 10 тонн), средние (10-100 тонн) и тяжелые (более 100 тонн). Основанием для данной классификации послужил анализ характеристик экранопланов различных проектов и потребностей в пассажирских перевозках по внутренним водным путям.

Кроме того, в работе Рождественского К.В. [5] предложена классификация типов положительного влияния экранного эффекта по категориям влияния геометрии крыла: преимущественного влияния хорды крыла на возникновение экранного эффекта и преимущественного влияния размаха крыла. Первый тип влияния экранного эффекта, за счет хорды крыла, приводит к увеличению вблизи экрана как коэффициента подъемной силы, так и коэффициента аэродинамического сопротивления. Однако, за счет более интенсивного прироста коэффициента подъемной силы по сравнению с

коэффициентом аэродинамического сопротивления, наблюдается прирост аэродинамического качества крыла при его движении вблизи экрана, по сравнению с движением вне экрана. Во втором случае прирост аэродинамического качества наблюдается, в основном, за счет снижения индуктивного сопротивления. Этот эффект продемонстрировал Февральских А.В. в работе [12] при исследовании компоновок судов, использующих положительное влияние экранного эффекта, с различными значениями удлинения крыла. Однако, как было показано в работе [12], для экранопланов с удлинением крыла больше 3,5, более остро встает вопрос обеспечения собственной продольной устойчивости движения, чем для экранопланов с крылом малого удлинения.

Обеспечение устойчивости движения экраноплана основывается на удовлетворении критериев взаимного расположения аэродинамических фокусов по высоте, углу тангажа и положения центра масс – критериев Иродова-Жукова-Февральских. В работе [8] Иродов показал, что положение аэродинамических фокусов и центра масс экраноплана на режиме устойчивого установившегося полета определяется следующими неравенствами (2).

$$\begin{cases} X_H - X_\alpha < 0 \\ X_G - X_\alpha < 0 \end{cases} \quad (2)$$

В системе неравенств (2): X_H - абсцисса аэродинамического фокуса по высоте, X_α - абсцисса аэродинамического фокуса по углу, X_G - абсцисса центра тяжести. Координаты отсчитаны в плоскости средней аэродинамической хорды от носка крыла в направлении хвостика. Жуковым В.И. [17; 18] эмпирически было установлено, что рекомендуемые значения для величины межфокусного расстояния $\Delta X = X_\alpha - X_H$ составляют 0,05...0,15 величин средней аэродинамической хорды. В дальнейшем [19] Февральских А.В. более строго обосновал требования, предъявляемые к межфокусному расстоянию, и показал их связь с величиной коэффициента подъемной силы в виде неравенства (3).

$$\Delta X < c_y S_H \quad (3)$$

В неравенстве (3): c_y - коэффициент подъемной силы, S_H – половина второй производной коэффициента момента тангажа по коэффициенту подъемной силы при заданном значении угла тангажа.

Для определения характерных зависимостей аэродинамических характеристик экранопланов от параметров движения над экраном и компоновочных размерений накоплен достаточно обширный объем методических материалов и данных, систематизированный, главным образом, в работах [4; 12; 19; 20]. Рекомендации использования материалов этих работ, а также других материалов, прошедших экспертный анализ, могли бы существенно уточнить и конкретизировать существующие правила классификации и постройки, тем самым, обеспечив необходимую для судостроителей определенность в части требований к экранопланам. Одновременно с этим, развиваются подходы и к численному моделированию аэродинамики экранных судов с использованием отечественных программ численного моделирования [23], которые хорошо подходят для определения семейства зависимостей аэродинамических характеристик и их производных, в том числе, характеристик устойчивости полета.

Сравнение действующих правил постройки и классификации экранопланов с результатами обзора различных предложенных типов классификации показывает, что действующие правила [2] напрямую, без проведения дополнительных исследований, распространяются только на легкие экранопланы типа А. При этом, например, возникают трудности с регистрацией сверхлегких беспилотных экранопланов,

которые, ввиду своих малых размеров и малой высоты движения над экраном, в соответствии с классификацией Международной морской организации могут принадлежать только к типам В или С. Таким образом, результаты обзора открытых источников по проблеме классификации экранопланов выявляют как минимум следующие существенные недостатки действующей классификационной документации:

1. Необходимость уточнения определения «экранного эффекта» в нормативных документах с точки зрения влияния на несущие свойства крыла или обводов судна.

2. Отсутствие определения требований к конструкции (размерений элементов компоновки) в части обеспечения экранных свойств регистрируемого судна.

3. Определение требований по устойчивости движения на режиме экранного полета, определяемых геометрическими соотношениями элементов компоновки.

Классификация скоростных амфибийных судов комбинированного типа

В конструкции первого серийного легкого пассажирского экраноплана «Волга-2» (рисунок 2) соединялись технические решения, направленные на использования преимуществ движения на воздушной подушке и использования положительного влияния экранного эффекта (по классификации работы [10] – СВП типа 5). Воздушная подушка на старте создавалась движительно-поддувным устройством винтокольцевого типа с направляющим аппаратом. Движение на крейсерской скорости выполнялось, в основном, за счет аэродинамической силы, формируемой набегающим потоком на крыле.



Рис. 2. Экраноплан «Волга - 2» [24]

В дальнейшем идеи соединения воздушной подушки и экранного крыла в компоновках скоростных амфибийных судов получили развитие в ряде проектов: ЦАГИ, Hoverwing, Swan и других (рисунок 3).



(a) судно на воздушной подушке-эканоплан проекта ЦАГИ [25]



(b) судно проекта Hoverwing [26]



(c) судно проекта SWAN [27]

Рис. 3. Проекты скоростных амфибийных судов с воздушной подушкой и экранным крылом

Характеристики судов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики скоростных амфибийных судов комбинированного типа

ЛТХ	Волга-2	Hoverwing UH-19XRW	751 Swan
Масса максимальная взлетная, т	2,950	1,066	8,1
Скорость крейсерская, км/ч	120	96	130
пассажироместимость	8	4	15
Длина, м	11	7,76	19
Ширина, м	8	7,32	13,4
Мощность двигателей полная, л.с.	300	256	630
Тип ВП	динамическая	статическая	динамическая
Страна-производитель	СССР	США	Китай

Приведенные в таблице 1 характеристики показывают, что на уровне стохастического исследовательского проектирования не выявлено устойчивых корреляций между несущими свойствами, размерениями и энерговооруженностью судов различных проектов.

В настоящее время не существует общепринятого подхода к классификации судов такого типа, однако, опираясь на опыт классификации СВП и экранопланов, можно выделить некоторые ключевые признаки, присущие скоростным амфибийным судам комбинированного типа: способ создания воздушной подушки (статическая – с помощью отдельного нагнетателя, или динамическая – с помощью движительно-

поддувного устройства) и компоновка несущего крыла (монокрыло или составное крыло). Составное крыло включает центроплан, нижняя поверхность которого частично или полностью занята воздушной подушкой, и консоли, на которых создается подъемная сила только за счет встречного потока. Наличие составного крыла в компоновке скоростного амфибийного судна комбинированного типа существенно влияет на характеристики устойчивости движения, поскольку аэродинамические характеристики консоли определяют положение аэродинамических фокусов, но не меняют положения центра давления воздушной подушки. Схематически совокупность требований по обеспечению продольной устойчивости движения скоростного амфибийного судна комбинированного типа можно представить в виде рисунка 4. Требования по соотношению абсцисс центра давления ВП и фокуса по высоте в настоящее время остаются не вполне проработанными, однако, можно предположить, что положение центра давления воздушной подушки ближе к хвосту крыла в сечении средней аэродинамической хорды по сравнению с положением фокуса по высоте будет более предпочтительным ввиду двух обстоятельств:

- 1) при таком соотношении абсцисс на режиме перехода от воздушной подушки к экранному полету судно будет приобретать дополнительный момент на кабрирование;
- 2) по мере набора высоты и уменьшении вклада воздушной подушки в формирование подъемной силы с одновременным увеличением вклада аэродинамики несущего крыла абсцисса фокуса по высоте будет увеличиваться, достигнув совпадения с абсциссой центра давления.

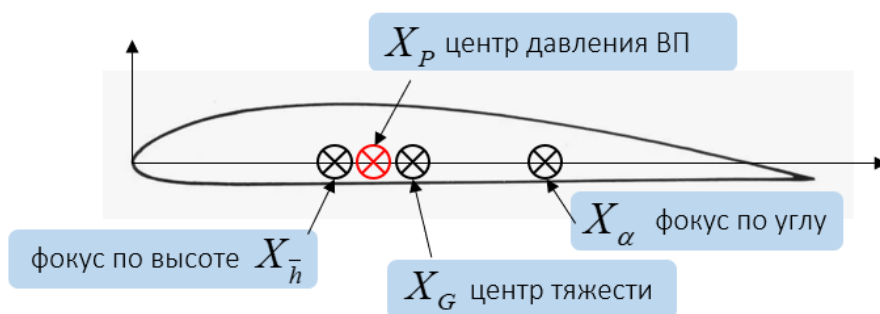


Рис. 4. Схема требований по обеспечению продольной устойчивости движения скоростного амфибийного судна комбинированного типа

Важно отметить, что замедление развития проектов скоростных амфибийных судов комбинированного типа, наблюдаемое в последние годы, связано, в том числе, и с рядом проектных ошибок, таких, как избыточная стреловидность несущего крыла, нерациональная компоновка центроплана и консоли, низкий уровень проработанности компоновки в части аэрогидродинамического сопротивления, управления движительно-поддувным устройством, обеспечения устойчивости движения и др. Этих ошибок можно было бы частично избежать при наличии научно-обоснованных правил классификации и постройки скоростных амфибийных судов комбинированного типа.

Исходя из проведенного анализа, рационально предложить следующую обобщенную классификацию скоростных амфибийных судов (рисунок 5).

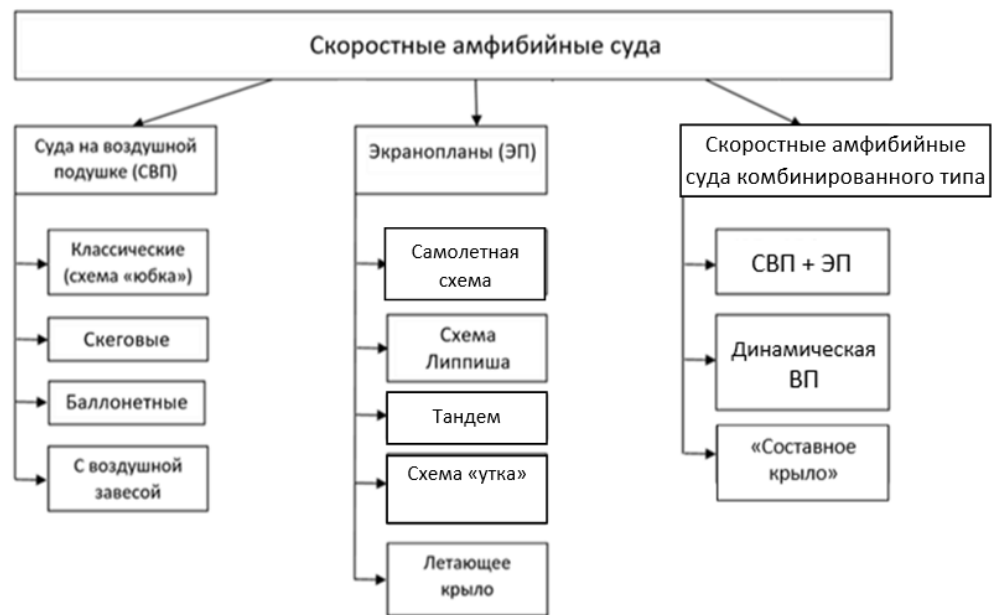


Рис. 5. Схема обобщенной классификации скоростных амфибийных судов

В классификационной схеме, представленной на рисунке 5, в качестве основного классификационного признака выбраны архитектурно-конструктивные особенности компоновки, определяющие обеспечение нужных значений аэрогидродинамического качества и собственной устойчивости крейсерского движения на ранних стадиях проектирования. В более общем подходе к составлению классификационной схемы скоростных амфибийных судов необходимо учитывать следующие признаки:

- массу при полной загрузке;
- мореходность;
- назначение судна;
- тип движителя;
 - минимальную и максимальную достигаемую дальность автономного хода при полной загрузке;
- ледовую ходкость;
- способность обеспечения заданных ходовых качеств при обледенении;
- геометрические характеристики обводов;
- маневренность;
- амфибийность (возможность движения по различным типам подстилающей поверхности);
- другие свойства.

Составление такой классификационной схемы является объемной и достаточно сложной работой, практической целью которой станет определение правил классификации и освидетельствования судов, проектирование которых на основе действующих нормативных документов остается сложной задачей для судостроительных компаний. Результаты анализа опубликованных научных трудов показывают возможность организации такой работы на их основе.

Заключение

Сочетание принципов движения с использованием положительного влияния экранного эффекта и воздушной подушки в проектах современных скоростных

амфибийных судов приводит к необходимости разработки общих «Правил постройки и классификации скоростных амфибийных судов», которые должны опираться на существующую нормативную базу с учетом необходимости ее расширения, обусловленной накоплением новых научно-технических знаний об этом виде техники. Разработка единой формализованной методики освидетельствования скоростных амфибийных судов различных типов – СВП, экранопланов и судов комбинированного типа – является достаточно сложной задачей, однако, к текущему моменту сформирован существенный научно-технический базис для ее решения.

В работе выполнен анализ классификаций архитектурно-конструктивных типов судов на воздушной подушке и экранопланов, и предложена единая классификация скоростных амфибийных судов, включая суда комбинированного типа. Классификация опирается на наиболее существенные компоновочные признаки, выделяя в качестве основной проблемы обеспечения безопасности эксплуатации скоростных амфибийных судов комбинированного типа сочетание требований по устойчивости движения на воздушной подушке и на режиме экранного полета.

Разработка общих правил «Постройки и классификации скоростных амфибийных судов» позволит не только определить проектные требования, но и помочь избежать ошибок проектирования скоростных амфибийных судов комбинированного типа, необходимых для обеспечения круглогодичной связанности отдаленных территорий Арктики, Сибири и Дальнего Востока, включая порты Северного Морского пути, с крупными населенными пунктами и промышленными центрами.

Список литературы

1. Инструкция по учету судов, плавучих объектов: ИР-03-2022 Версия 4.5 // Российское Классификационное Общество. – URL: https://rfclass.ru/uploads/unifitsirovannyj_klassifikator_tipov_grupp_i_vidov_sudov-4_5.pdf (дата обращения 06.11.2025).
2. Правила классификации и постройки судов // Российское Классификационное Общество. – URL: https://rfclass.ru/uploads/pkps/pkps_rko_vvedeny_v_dejstvie_s_07-09-2025.pdf (дата обращения 06.11.2025).
3. Белавин, Н.И. Экранопланы / Н.И. Белавин. – Л.: Судостроение, 1977. – 232 с.
4. Маскалик, А.И. Экранопланы: транспортные суда 21 века / А.И. Маскалик, Р.А. Нагапетян, В.В. Иваненко, А.Г. Бутлицкий, В.В. Томилин, А.И. Лукьянов. – СПб.: Судостроение, 2005. – 576 с. – ISBN 5-7355-0668-4.
5. Rozhdestvensky, K.V. Wing-in-ground effect vehicles / K.V. Rozhdestvensky // Progress in aerospace sciences. – № 42. – 2006. – pp. 211-283.
6. Плисов, Н.Б. Аэрогидродинамика судов с динамическими принципами поддержания / Н.Б. Плисов, К.В. Рождественский, В.К. Трешков. – Л.: Судостроение, 1991. – 247 с.
7. Демешко, Г.В. Проектирование судов. Амфибийные СВП: Учебник. В 2-х кн. Кн. 1. / Г.В. Демешко. – СПб: Судостроение, 1992. – 269 с.
8. Иродов, Р.Д. Критерии продольной устойчивости экраноплана / Р.Д. Иродов // Ученые записки ЦАГИ – 1970. – №4. – Т.1. – с.63-72.
9. Fevral'skikh, A.V. A development of longitudinal static stability analysis method of a WingIn-Ground effect vehicle in cruise during the design process / A. V. Fevral'skikh // Ocean Engineering, 2021, номер статьи 110187, 10.1016/j.oceaneng.2021.110187.
10. Бенуа, Ю.Ю. Суда на воздушной подушке / Ю.Ю. Бенуа, В.М. Корсаков. – Л.: Судпромгиз, 1962. – 121 с.
11. Кользаев, Б.А. Справочник по проектированию судов с динамическими принципами поддержания / Б.А. Кользаев, А.И. Косоруков, В.А. Литвиненко // Л.: Судостроение, 1980. – 472 с.
12. Февральских, А.В. Разработка методики проектирования аэрогидродинамической компоновки амфибийного судна на воздушной подушке с аэродинамической разгрузкой на основе численного моделирования : специальность 05.08.01 "Теория корабля и строительная механика" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Февральских Андрей Владимирович, 2017. – 175 с.

13. Демешко, Г.В. Проектирование судов. Амфибийные СВП: Учебник. В 2-х кн. Кн. 1. / Г.В. Демешко. – СПб: Судостроение, 1992. – 269 с.
14. Phan Anh Tuan. A Study on Hovercraft Resistance Using Numerical Modeling / Applied Mechanics and Materials, Vol. 842, pp 186-190.
15. Аксенов, А.А. Использование приповерхностных сеток для численного моделирования вязкостных явлений в задачах гидродинамики судна / А.А. Аксёнов, В.И.Похилко, А.П.Моряк // Компьютерные исследования и моделирование. – 2023. – Т. 15. – № 4. – С. 995–1008.
16. Guidelines for wing-in-ground craft / International Maritime Organization <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Safety/Documents/MSC.1-CIRC.1592.pdf> (дата обращения 22.11.2025).
17. Kornev, N. Complex numerical modeling of dynamics and crashes of wing-in-ground-vehicles / N. Kornev, K. Matveev // American Institute of Aeronautics and Astronautics. – 2003. – AIAA Paper 2003-600. – pp.1-9.
18. Жуков, В.И. Особенности аэродинамики, устойчивости и управляемости экраноплана / В.И. Жуков. - М.: Издательский отдел ЦАГИ, 1997.
19. Fevral'skikh, A.V. A development of longitudinal static stability analysis method of a Wing-In-Ground effect vehicle in cruise during the design process / A. V. Fevral'skikh // Ocean Engineering, 2021, номер статьи 110187, 10.1016/j.oceaneng.2021.110187.
20. Rozhdestvensky, K.V. Aerodynamics of a lifting system in extreme ground effect / K.V. Rozhdestvensky // Heidelberg: Springer, 2000, p. 352.
21. Панченков, А.Н. Экспертиза экранопланов / А.Н. Панченков, П.Т. Драчев, В.И. Любимов. – Н. Новгород: Издательство «Поволжье», 2006. – 655 с.
22. Февральских, А.В. Проектирование аэродинамической компоновки экраноплана с использованием технологий цифрового двойника / А.В. Февральских // Морской вестник. – 2021. – № 3(79). – с. 14-20.
23. Февральских А.В. Численное моделирование обледенения крыла малого удлинения в условиях действия экранного эффекта / А.В. Февральских // Наука и бизнес: пути развития. – № 9(159). – С. 16-21.
24. Экраноплан «Волга-2» // Авиационная энциклопедия «Уголок неба». – URL: <https://airwar.ru/enc/sea/volga2.html> (дата обращения 23.11.2025).
25. Агуреев, П.А. Динамически подобная модель амфибийного летательного аппарата / П.А. Агуреев, А.О. Бондарев, А.В. Усов, С.В. Ходунов // Материалы XXXI Научно-Технической Конференции по Аэродинамике, ЦАГИ, 29-30 октября 2020 года.
26. Hoverwing 19XRW // 19XR Sport & 19XRW Hoverwing Description. – URL: <https://www.flyhovercraft.com/blank-page> (дата обращения 23.11.2025).
27. Экранопланы по схеме Р.Е. Алексева типа КМ // Опытные экранопланы типа 751 SWAN. – URL: https://ekranoplan.ru.narod.ru/C61.htm?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera (дата обращения 23.11.2025).

References

1. Instrukciya po uchetu sudov, plavuchih ob"ektov: IR-03-2022 Versiya 4.5 // Rossijskoe Klassifikacionnoe Obshchestvo. – URL: https://rfclass.ru/uploads/unifitsirovannyj_klassifikator_tipov_grupp_i_vidov_sudov-4_5.pdf (data obrashcheniya 06.11.2025).
2. Pravila klassifikacii i postrojki sudov // Rossijskoe Klassifikacionnoe Obshchestvo. – URL: https://rfclass.ru/uploads/pkps/pkps_rko_vvedeny_v_dejstvie_s_07-09-2025.pdf (data obrashcheniya 06.11.2025).
3. Belavin, N.I. Ekranoplany / N.I. Belavin. – L.: Sudostroenie, 1977. – 232 s.
4. Maskalik, A.I. Ekranoplany: transportnye suda 21 veka / A.I. Maskalik, R.A. Nagapetyan, V.V. Ivanenko, A.G. Butlickij, V.V. Tomilin, A.I. Luk'yanov. – SPb.: Sudostroenie, 2005. – 576 s. – ISBN 5-7355-0668-4.
5. Rozhdestvensky, K.V. Wing-in-ground effect vehicles / K.V. Rozhdestvensky // Progress in aerospace sciences. – № 42. – 2006. – pp. 211-283.
6. Plisov, N.B. Aerogidrodinamika sudov s dinamicheskimi principami podderzhaniya / N.B. Plisov, K.V. Rozhdestvenskij, V.K. Treshkov. – L.: Sudostroenie, 1991. – 247 s.

7. Demeshko, G.V. Proektirovanie sudov. Amfibijnye SVP: Uchebnik. V 2-h kn. Kn. 1. / G.V. Demeshko. – SPb: Sudostroenie, 1992. – 269 c.
8. Irodov, R.D. Kriterii prodol'noj ustojchivosti ekranoplana / R.D. Irodov // Uchenye zapiski CAGI – 1970. – №4. – T.1. – s.63-72.
9. Fevral'skikh, A.V. A development of longitudinal static stability analysis method of a WingIn-Ground effect vehicle in cruise during the design process / A. V. Fevral'skikh // Ocean Engineering, 2021, nomer stat'i 110187, 10.1016/j.oceaneng.2021.110187.
10. Benua, Yu.Yu. Suda na vozduшной podushke / Yu.Yu. Benua, V.M. Korsakov. – L.: Sudpromgiz, 1962. – 121 s.
11. Kolyzaev, B.A. Spravochnik po proektirovaniyu sudov s dinamicheskimi principami podderzhaniya / B.A. Kolyzaev, A.I. Kosorukov, V.A. Litvinenko // L.: Sudostroenie, 1980. – 472 s.
12. Fevral'skih, A.V. Razrabotka metodiki proektirovaniya aerogidrodinamicheskoy komponovki amfibijnogo sudna na vozduшной podushke s aerodinamicheskoy razgruzkoj na osnove chislenного modelirovaniya : special'nost' 05.08.01 "Teoriya korablya i stroitel'naya mekhanika": dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk / Fevral'skih Andrej Vladimirovich, 2017. – 175 s.
13. Demeshko, G.V. Proektirovanie sudov. Amfibijnye SVP: Uchebnik. V 2-h kn. Kn. 1. / G.V. Demeshko. – SPb: Sudostroenie, 1992. – 269 c.
14. Phan Anh Tuan. A Study on Hovercraft Resistance Using Numerical Modeling / Applied Mechanics and Materials, Vol. 842, pp 186-190.
15. Aksenov, A.A. Ispol'zovanie pripoverhnostnyh setok dlya chislenного modelirovaniya vyazkostnyh yavlenij v zadachah gidrodinamiki sudna / A.A. Aksyonov, V.I.Pohilko, A.P.Moryak // Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie. – 2023. – T. 15. – № 4. – S. 995–1008.
16. Guidelines for wing-in-ground craft / International Maritime Organization <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Safety/Documents/MSC.1-CIRC.1592.pdf> (data obrashcheniya 22.11.2025).
17. Kornev, N. Complex numerical modeling of dynamics and crashes of wing-in-ground-vehicles / N. Kornev, K. Matveev // American Institute of Aeronautics and Astronautics. – 2003. – AIAA Paper 2003-600. – pp.1-9.
18. Zhukov, V.I. Osobennosti aerodinamiki, ustojchivosti i upravlyaemosti ekranoplana / V.I. Zhukov. - M.: Izdatel'skij otdel CAGI, 1997.
19. Fevral'skikh, A.V. A development of longitudinal static stability analysis method of a Wing-In-Ground effect vehicle in cruise during the design process / A. V. Fevral'skikh // Ocean Engineering, 2021, nomer stat'i 110187, 10.1016/j.oceaneng.2021.110187.
20. Rozhdestvensky, K.V. Aerodynamics of a lifting system in extreme ground effect / K.V. Rozhdestvensky // Heidelberg: Springer, 2000, p. 352.
21. Panchenkov, A.N. Ekspertiza ekranoplanov / A.N. Panchenkov, P.T. Drachev, V.I. Lyubimov. – N. Novgorod: Izdatel'stvo «Povolzh'e», 2006. – 655 s.
22. Fevral'skih, A.V. Proektirovanie aerodinamicheskoy komponovki ekranoplana s ispol'zovaniem tekhnologij cifrovogo dvojnika / A.V. Fevral'skih // Morskoj vestnik. – 2021. – № 3(79). – c. 14-20.
23. Fevral'skih A.V. Chislennoe modelirovanie obledeneniya kryla malogo udlineniya v usloviyah dejstviya ekrannogo effekta / A.V. Fevral'skih // Nauka i biznes: puti razvitiya. – № 9(159). – S. 16-21.
24. Ekranoplan «Volga-2» // Aviacionnaya enciklopediya «Ugolok neba». – URL: <https://airwar.ru/enc/sea/volga2.html> (data obrashcheniya 23.11.2025).
25. Agureev, P.A. Dinamicheski podobnaya model' amfibijnogo letatel'nogo apparata / P.A. Agureev, A.O. Bondarev, A.V. Usov, S.V. Hodunov // Materialy XXXI Nauchno-Tekhnicheskoy Konferencii po Aerodinamike, CAGI, 29-30 oktyabrya 2020 goda.
26. Hoverwing 19XRW // 19XR Sport & 19XRW Hoverwing Description. – URL: <https://www.flyhovercraft.com/blank-page> (data obrashcheniya 23.11.2025).
27. Ekranoplany po skheme R.E. Alekseeva tipa KM // Opytnye ekranoplany tipa 751 SWAN. – URL: https://ekranoplan-ru.narod.ru/C61.htm?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera (data obrashcheniya 23.11.2025).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Февральских Андрей Владимирович, д.т.н., доцент кафедры «Энергетические установки и тепловые двигатели», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (ФГБОУ ВО НГТУ им. Р.Е. Алексеева), 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: a.fevralskih@gmail.com

Andrey V. Fevralskikh, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Power plants and heat engines», Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 24, Minin Street, 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), terkor54@mail.ru

Eugeny M. Gramuzov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department «Shipbuilding and aviation technology», Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 24, Minin Street, Nizhny Novgorod, 603155

Карпиков Юрий Андреевич, аспирант кафедры «Энергетические установки и тепловые двигатели», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (ФГБОУ ВО НГТУ им. Р.Е. Алексеева), 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: yourockkarp@mail.ru

Yuriy A. Karpikov, graduate student of the Department «Power plants and heat engines», Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 24, Minin Street, Nizhny Novgorod, 603155

Статья поступила в редакцию 04.12.2025; принята к публикации 05.02.2026; опубликована онлайн 20.03.2026. Received 04.12.2025; published online 20.03.2026.

УДК 531.391.1:532.5.011
DOI: 10.37890/jwt.vi86.690

Исследование гидродинамики маломерного судна с тоннельной кормой численными методами

Е.Ю. Чебан¹

ORCID: 0000-0002-0983-9879

Д.В. Никущенко²

ORCID: 0000-0001-8549-772X

А.А. Моляков³

ORCID: 0000-0002-8550-2418

¹*Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия*

²*Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, г. Санкт-Петербург, Россия*

³*Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия*

Аннотация. Тоннели в корпусе маломерного судна являются одним из способов повышения гидродинамических характеристик. В работе изложены результаты численного моделирования гидродинамики маломерного судна с тоннелем в кормовой части днища кормой $D=250$ мм, $D=375$ мм и $D=420$ мм при движении со скоростями от 10 м/с до 22 м/с, что соответствует диапазону чисел Фруда от 2.090, до 4.597 в переходном режиме и режиме устойчивого глиссирования. Параметры численного моделирования, включая расчетную сетку, модель турбулентности и т.д., устанавливались на основании сравнения с результатами модельных экспериментов, которое показало хорошее совпадение. В результате численного моделирования установлено, что появление тоннелей приводит к уменьшению осадки и угла дифферента, но одновременно к повышению сопротивления. Наилучшие значения гидродинамических характеристик получены для тоннеля $D=375$ мм. Замечено, что тоннель позволяет получать волны большей высоты, чем судно без тоннеля, которые могут быть использованы для водных видов спорта. Использование тоннелей требует тщательного одновременного учета всех гидродинамических особенностей корпуса маломерного глиссирующего судна.

Ключевые слова: тоннель, вычислительная гидродинамика, глиссирование, гидродинамические характеристики, сопротивление, маломерное судно, модельные испытания

CFD study on hydrodynamic of a boat with a tunnel stern

Egor Yu. Cheban¹

ORCID: 0000-0002-0983-9879

Dmitry V. Nikushchenko²

ORCID: 0000-0001-8549-772X

Alexandr A. Mol'kov³

ORCID: 0000-0002-8550-2418

¹*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

²*St. Petersburg state marine technical university, St. Petersburg, Russia*

³*Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia*

Abstract. Tunnels in the hull of a boat are one of the ways to improve the hydrodynamic characteristics. This paper presents the results of numeral modelling of the hydrodynamics of a boat with a tunnel in the stern part of the bottom. The diameter of the tunnels was $D=250\text{mm}$, $D=375\text{mm}$ and $D=420\text{mm}$. Boat moving at speeds from 10 m/sec to 22 m/sec, which corresponds to the range of Froude number raging from 2.080 to 4.597 in the transient mode and stable planing mode. The parameters of numerical modelling, including computational grid, turbulence model, etc., were established based on comparison with the results of the model experiments showing good agreement. As a result of numerical modelling, it was found that the appearance of tunnels leads to a decrease in draft and trim angle, but at the same time leads to an increase in drag. The best values of the hydrodynamic characteristics were achieved for the tunnel $D=375\text{mm}$. It has been noted, that the tunnel produces higher waves than a vessel without a tunnel which can be used for water sports. The use of tunnels requires careful consideration of all hydrodynamic properties of a planing boat's hull.

Keywords: speed boat, tunnel hull, CFD, hydrodynamic characteristics, hydrodynamic quality, hydrodynamic characteristics, planning regime, towing test.

Введение

Различные условия эксплуатации маломерных судов требуют создания соответствующих форм корпусов, включающие продольные и поперечные реданы, транцевые плиты, выпрямители и т.д. Все эти элементы так или иначе позволяют управлять потоком жидкости вокруг корпуса с целью улучшения мореходных качеств и потребительских характеристик маломерных судов. Одним из таких элементов могут быть тоннели, представляющие собой специальные обтекатели или внутренние каналы на корпусе судна.

Установка тоннелей на высокоскоростные суда может позволить снизить волновое и брызговое сопротивление за счет создания зон пониженного давления и уменьшения интенсивности локальных турбулентных вихрей. Тоннели могут повышать устойчивость судна при резких маневрах или воздействии внешних факторов, таких как волновые воздействия и порывы ветра.

Одной из причин использования тоннелей на маломерных судах в условиях мелководных водоемов является попытка защитить движительно-рулевой комплекс, в первую очередь водометный, от ударов и плавающих предметов. С этой же целью существуют попытки установки тоннелей на маломерные суда с традиционным подвесным мотором и гребным винтом (рис.1).



Рис. 1. Варианты тоннеля в кормовой части маломерного судна с гребным винтом (источник фотографий <https://spyship.ru/testy/zashhita-lodochnogo-motora-i-grebnogo-vinta-tunnelem.html>)

Размеры и форма тоннеля должны обеспечивать плавное перенаправление потоков без создания дополнительных зон с повышенным давлением или турбулентностью, однако из практики известно, что использование обводов

быстроходных и скоростных судов с тоннелями не всегда приводит к желаемому повышению гидродинамических характеристик (ГДХ), поскольку любые изменения формы корпуса приводят к сложному взаимодействию потоков на днище судна и соответственно к перераспределению давления. Рекомендации по размерам и форме тоннелей для судов разных размеров отсутствуют.

Многие известные исследования скоростных судов с тоннелями относятся в первую очередь к многокорпусным судам – катамаранам и тримаранам.

В 2013 г. Morteza Ghassabzadeh и Hassan Ghassemi [1] с помощью программного комплекса CFD FLUENT 6.3 выполнили исследование гидродинамики скоростного тримарана при Fr от 0,5 до 4,0. В ходе моделирования изменялась форма тоннелей на корпусе тримарана. Результаты работы позволили определить форму тоннелей, соответствующую минимальному сопротивлению и необходимому эксплуатационному углу дифферента. Проведенное в дальнейшем сравнение с результатами модельных испытаний в опытовом бассейне [3] показало хорошую сходимость. Численному и экспериментальному исследованию возможности улучшения ГДХ маломерного глиссирующего тримарана, корпус которого включает два тоннеля прямоугольной формы, посвящена работа [3]. В статье описаны результаты моделирования гидродинамического взаимодействия тоннелей корпуса с носовой оконечностью различной формы в диапазоне чисел Фруда 2,1-4,72 для судна с шестью степенями свободы. Похожие исследования были выполнены в работах [4-7]. Оценке гидродинамики однокорпусного судна с двумя тоннелями в кормовой части посвящена работа Florin Pacuraru, Andreea Mandru и Adham Bekhit и Университета Галаца [8]. В работе оценивалось изменение сопротивления, смоченной поверхности, угла дифферента и осадки при увеличении скорости. Результаты численного моделирования показали, что тоннель в кормовой части ниша не оказывает существенного влияния в характеристики судна, а исключением зоны пониженного давления на днище, что может благоприятно влиять на работу движителя. В то же время исследование выполнено для скоростей от 10 до 40 узлов (18-75 км/ч) с большой дискретностью (8 точек), что не позволило в достаточной степени исследовать переходную область. Как показано в работах [9,10] даже незначительное изменение геометрии корпуса маломерного глиссирующего судна приводит к изменению его гидродинамических характеристик (ГДХ), что требует более детального моделирования как по диапазонам скоростей, так и по вариантам геометрических параметров. Следовательно, вопрос использования тоннельных обводов для повышения ГДХ скоростных маломерных судов остается актуальным. Поэтому целью настоящей работы является оценка изменения ГДХ скоростного маломерного судна с тоннелями разного размера.

1. Объект и методы исследования

Современным методом оценки ГДХ маломерных скоростных судов, позволяющим не только избежать масштабного эффекта за счет использования геометрии корпуса в натурную величину, но и получить дополнительную информацию о гидродинамике судна, например, распределение давления по корпусу, является вычислительная гидродинамика (CFD) [8]. Для исследования гидродинамики маломерного глиссирующего катера с тоннелем в корпусе использовался программный комплекс FineMarine™, результаты моделирования скоростных судов в котором, показали хорошее совпадение с модельными и натурными экспериментами [8,9]. В основе FineMarine™ лежит метод RANS для решения дифференциальных уравнений движения жидкости.

Исследовалась геометрия корпуса катера, для которой ранее были проведены модельные испытания (рис. 2). Тоннель располагался в кормовой части катера, диаметр тоннеля в процессе исследования изменялся (табл. 1). Поперечные и

продольные реданы на корпусе отсутствовали. Оценка изменения ГДХ проводилась сравнением с контрольным моделированием катера без тоннеля.

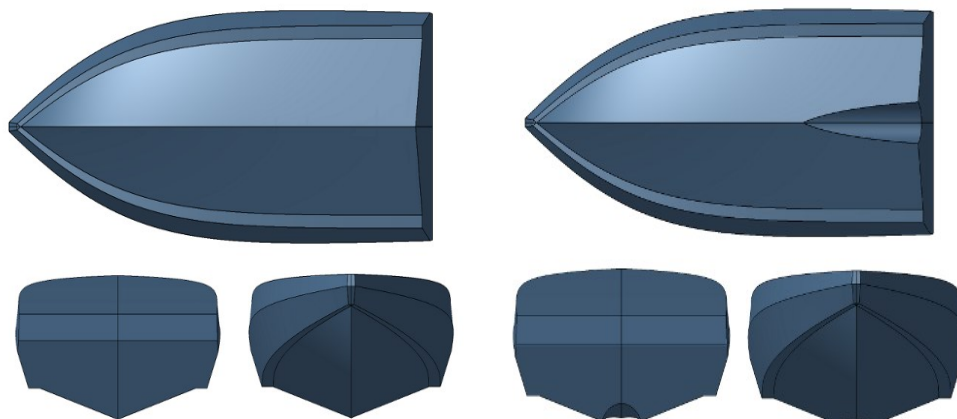


Рис. 2. Геометрия катера. а) исходный корпус; б) корпус с тоннелем D=420 мм.

Таблица 1

Характеристики моделируемых корпусов катера

1.	Диаметр тоннеля, мм	0	250	375	420
2.	Координаты ЦТ				
	x	1.77	1.77	1.77	1.77
	y	0	0	0	0
	z	0.884	0.71	0.69	0.712
3.	Масса, кг	1501	1501	1501	1501
4.	Матрица инерции, кг*м ²				
	I_{xx}	908.70	874.82	873.54	878.91
	I_{yy}	4755.027	3560.84	3558.26	3557.916
	I_{zz}	5231.52	4074.001	4072.657	4067.829
	$I_{yz} = I_{zy}$	0	0	0	0
	$I_{zx} = I_{xz}$	7.488	109.17	107.674	173.553
	$I_{yx} = I_{xy}$	0	0	0	0
5.	Начальный дифферент, град	0.0243	0.021	0.021	0.02
6.	Начальная осадка, м	0.2	0.2	0.2	0.2
7.	Скорость, м/с	10, 12, 14, 16, 18, 20, 22			
8.	Числа Фруда	2.090, 2.508, 2.925, 3.343, 3.761, 4.179, 4.597			

2. Численное моделирование гидродинамики глиссирующего катера с тоннелями

Параметры расчетной сетки выбирались на основании сравнения результатов численного моделирования с модельными испытаниями катера [9]. Использовались три варианта неструктурированной расчетной сетки различной плотности (рис.3). Как показали результаты оценки сеточной сходимости, наиболее близкие к модельным результаты показала расчетная сетка средней плотности (рис. 3) с разрешением пограничного слоя не более 10. Это позволило экстраполировать результаты численного моделирования для выработки общих подходов к построению сеток для маломерных судов аналогичных размеров, движущихся в аналогичных условиях. Поскольку при увеличении скорости доля трения в общем сопротивлении для скоростных судов снижается, то y^+ принимался равным не более 200 и соответствующее разрешение пограничного слоя сеткой было минимально

необходимым - 4-9 уровней разрешения. Параметры расчетных сеток для численного моделирования гидродинамики катера с тоннелями приведены в табл. 2.

Как правило, для более точного моделирования потоков в областях с существенными изменениями характера потока необходимо дополнительное измельчение сетки.

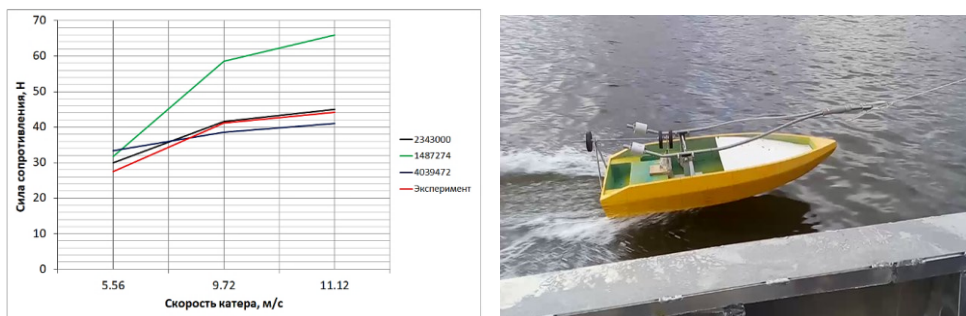


Рис. 3. Сравнение результатов моделирования на разных сетках с результатами модельного эксперимента

Таблица 2

Параметры расчетных сеток

			Разрешение пограничного слоя
1.	Начальная сетка	40x8x16	
2.	Адаптация		
	палуба	4	-
	тоннель	6	9
	днище	6	9
	транец	8	4
	борт и скула	6	9
	свободная поверхность	8	-
3.	Локальная адаптация потока в корме (бокс 2x2x0,3м)	8	-
4.	Общее число ячеек		
	-исходный катер без тоннеля	2886372	
	- тоннель d=250мм	2785343	
	- тоннель d=375мм	2795729	
	- тоннель d=420мм	2854382	

Предполагалось, что при движении катера тоннель будет создавать дополнительное волнение и брызги, в кормовой части была произведено дополнительное измельчение сетки с помощью прямоугольной области размерами 2x2x0,3 м в районе свободной поверхности. Кроме того, дополнительное измельчение сетки было выполнено и в области самого тоннеля. Результирующая расчетная сетка приведена на рис. 4.

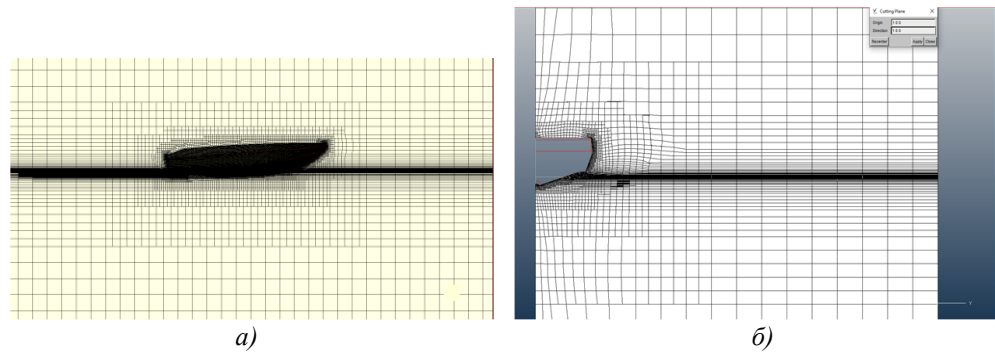


Рис. 4. Вид расчетной сетки: а) продольное сечение б) поперечное сечение

Для моделирования использовалась комбинация граничных условий для симметричного тела (рис. 5., табл. 3), подтвержденная исследованием [9]. Для более точного расчета гидродинамического следа за судном расчетная область была удлинена в корму на величину порядка 3,5 длин корпуса катера.

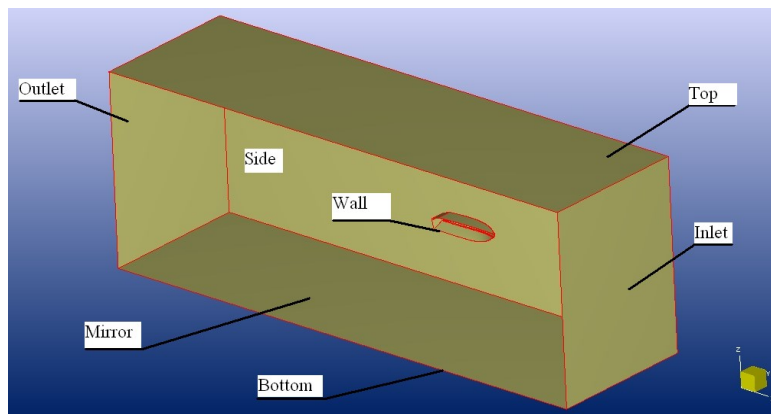


Рис. 5. Граничные условия на гранях расчетной области.

Таблица 3

Граничные условия на гранях расчетной области

Грани	Тип граничного условия
Верх и дно (Top and bottom)	“Prescribed pressure” > “Updated hydrostatic pressure”
Выход-вход-боковая грань (Outlet, Side, Inlet)	“Far field” (velocity components equal to zero)
Плоскость симметрии (Mirror)	“mirror” (symmetry)
Корпус катера	all solids – “Wall function”
Палуба	“Slip” (zero shear stress)

Поскольку глиссирование маломерного судна сопровождается существенным изменением его посадки, в первую очередь осадки и дифферента, моделировалось судно с тремя степенями свободы: движение вперед, всплытие, вращение относительно поперечной оси. Масса катера во всех случаях была постоянной, судно изменяло свое положение под действием гидродинамических сил. Моделирование выполнялось в нестационарной постановке с использованием дополнительных моделей для корректировки давления на поверхности корпуса и компенсации изменения положения судна. Схема дискретизации по времени - 2 порядка назад.

Одним из условий адекватности результатов численного моделирования является выбор модели турбулентности. В настоящей работе на основании ранее выполненных исследований [9] использовалась «К- ω SST» модель турбулентности с пристеночными функциями.

3. Результаты и обсуждение

В результате моделирования определялись: значения силы сопротивления и подъемной силы, осадка и угол дифферента, площадь смоченной поверхности.

Необходимо отметить, что несмотря на ряд использованных дополнительных моделей для двух случаев (без тоннеля и с тоннелем диаметром 375 мм) при скорости 10 м/с выполнить моделирование не удалось. Как показал анализ результатов, в этих случаях происходило резкое увеличение угла дифферента катера и последующее его уменьшение за короткие промежутки времени в десятые и сотые доли секунды. Похожее поведение маломерных судов было неоднократно замечено в натуральных условиях, и относится к трудно моделируемым для обычных корабельных задач, физическим проблемам, требующим использования моделей удара о поверхность жидкости. В остальных случаях происходил выход судна на устойчивое глиссирование при $Fr > 2$, которое сопровождалось уменьшением угла дифферента и осадки (рис. 6 и рис.7). Графики изменения осадки (рис.6) показывают, что катер с тоннелями действительно обладает меньшей осадкой, по сравнению с обычными обводами. Наибольшее уменьшение осадки происходит при диаметре тоннеля $D=375$ мм на 33-37 процента от осадки катера без тоннеля в таких же условиях. Осадки при $D=250$ и $D=420$ мм друг от друга отличаются мало. Графики для $D=250$ мм содержат изломы при скоростях 16 и 18 м/с, причем излом графика изменения осадки также происходит у катера без тоннеля при скорости 20 м/с и может служить признаком начала неустойчивого режима движения (рикошетирования). Расчеты для данной точки выполнялись повторно и показали, что данный минимум на кривой для корпуса без тоннеля не является ошибкой численного моделирования и является характерным для катера без тоннеля. По всей видимости, в ряде случаев тоннель в корпусе маломерного судна может благоприятно влиять на гидродинамику маломерного судна за счет перераспределения давления по поверхности его корпуса и позволяет избегать опасных неустойчивых режимов движения.

Для всех вариантов корпусов судна дифферент при увеличении скорости уменьшается (рис.7) и для тоннельных обводов стабилизируется при скоростях 16-18 м/с, но увеличивается для корпуса без тоннеля. При скоростях меньших 10 м/с дифферент в корму достигает значений 5 и более градусов, что может свидетельствовать об излишнем смещении ЦТ судна в корму. Это требует пересмотра положения ЦТ по длине судна, в том числе, возможно, использования иной компоновки катера.

Численное моделирование показало, что одним из отрицательных последствий установки тоннелей в корпусе маломерного судна является существенное увеличение сопротивления (рис. 8-10). При всех диаметрах тоннелей рост сопротивления происходит быстрее, чем для катера без тоннеля. Величины полного сопротивления для тоннелей всех диаметров превышают сопротивление катера без тоннеля на величину от 14 до 36 процентов (рис. 8(a)). Минимальная величина относительного сопротивления наблюдается у катера с тоннелем диаметром 375 мм при скоростях больших 14 м/с. Данный факт по всей видимости объясняется по всей видимости меньшей, чем у остальных тоннелей площадью смоченной поверхности (рис. 10), причем необходимо отметить, что площадь смоченной поверхности катера без тоннеля меньше во всех случаях, чем у тоннельных обводов (рис.10). Если сравнивать скорость роста сопротивления, то на основании работы [9] можно отметить, что для аналогичного катера с гидролыжей, которая также позволяет уменьшить осадку, величина сопротивления возрастает значительно медленнее и на меньшую величину.

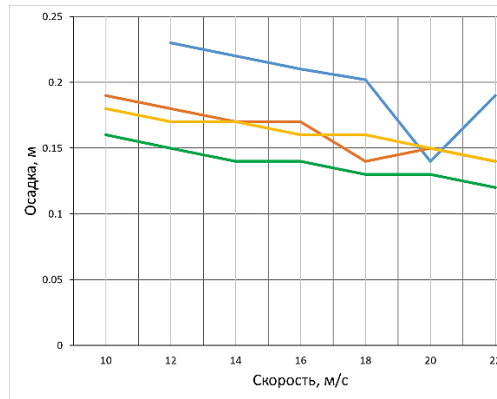


Рис. 6. Изменение осадки катера при увеличении скорости

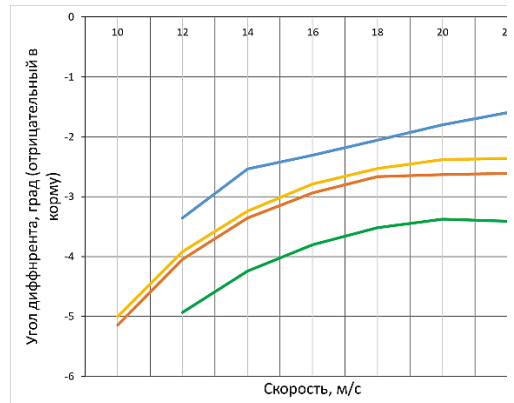
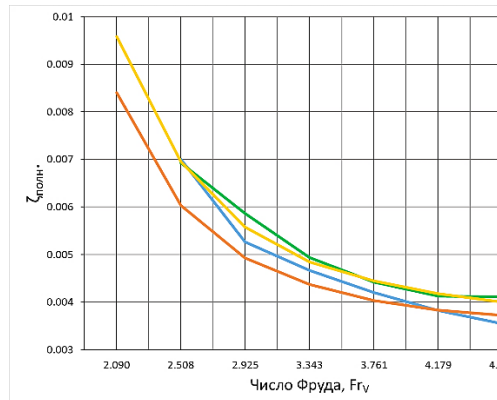
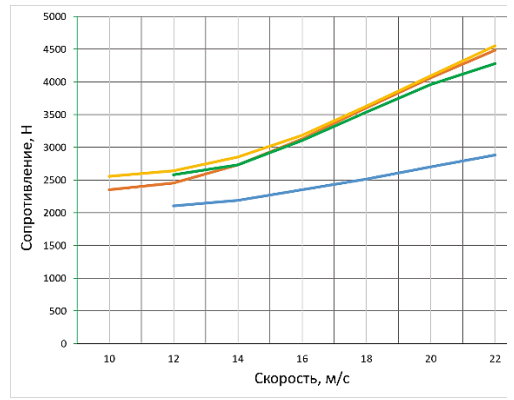


Рис. 7. Изменение угла дифферента катера



а)



б)

Рис. 8. Коэффициент полного сопротивления (а) и абсолютная величина сопротивления (б) катера с тоннелями различного диаметра

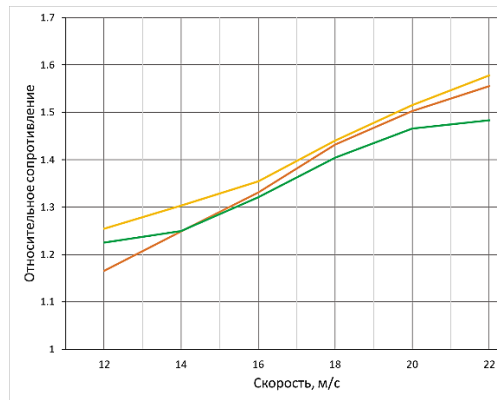


Рис. 9. Относительное сопротивление

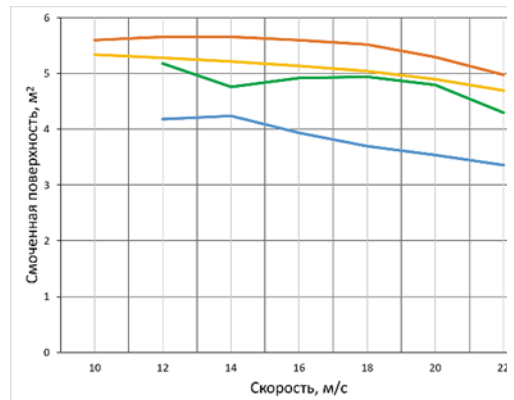


Рис. 10. Площадь смоченной поверхности катера с тоннелями разного диаметра

Рассмотрение распределения жидкости по корпусу судна показывает, что тоннель способствует «подсосу» воздуха под днище катера (рис. 11 и 12), который наиболее интенсивно происходит при $D=375$ мм. Подобные эффекты могут быть вызваны нефизическими ошибками численного моделирования, что потребовало использования дополнительных моделей компенсации струй вокруг корпуса. В ряде случаев уменьшение площади смоченной поверхности за счет появления воздуха под днищем полезно, поскольку приводит к снижению сопротивления, однако пузырьки воздуха могут приводить к возникновению кавитации гребного винта подвесного двигателя.

При глиссировании катера без тоннеля подъемная сила обеспечивается корпусом и в меньшей степени бортовыми реданами. Для катера с тоннелями смоченная поверхность распределена менее равномерно с существенным переходом давления на бортовые реданы (рис. 11-13). На кромках тоннелей наблюдаются области пониженного давления, которые могут приводить к возникновению отрывных течений.

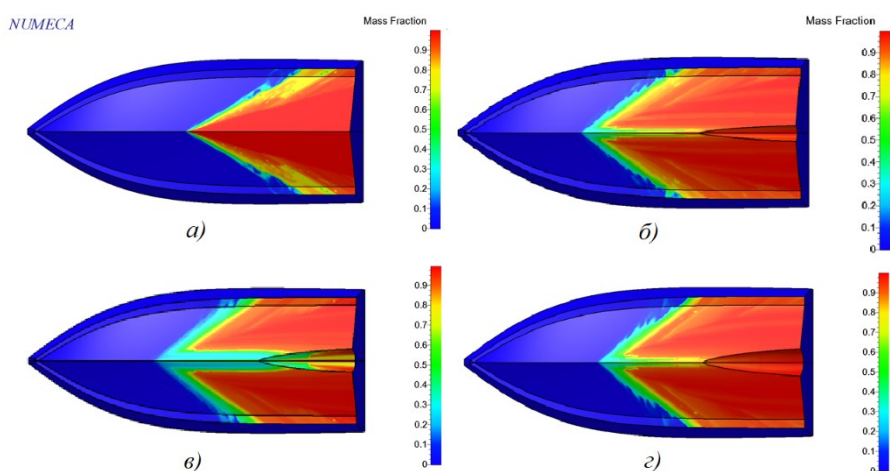


Рис. 11. Площадь смоченной поверхности катера при скорости $v = 22$ мм/с (вид на дно): а) $D=0$; б) $D=250$ мм; в) $D=375$ мм; г) $D=420$ мм.

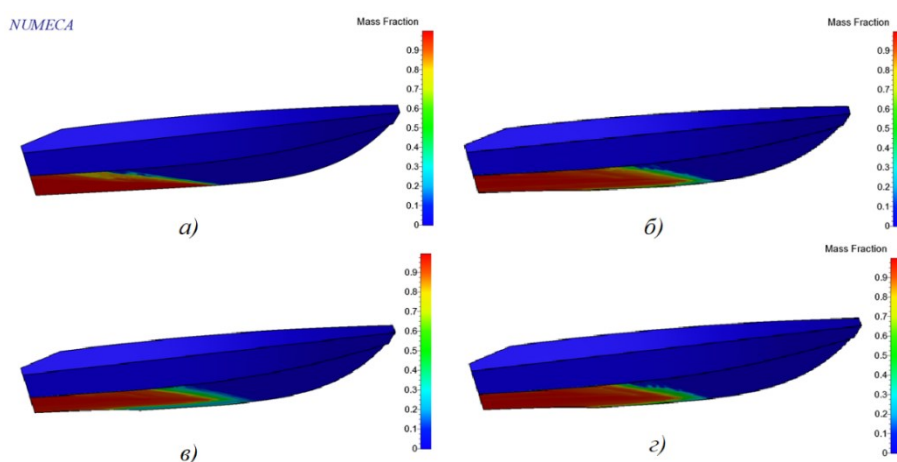


Рис. 12. Площадь смоченной поверхности катера при скорости $v = 22$ мм/с (вид на борт): а) $D=0$; б) $D=250$ мм; в) $D=375$ мм; г) $D=420$ мм.

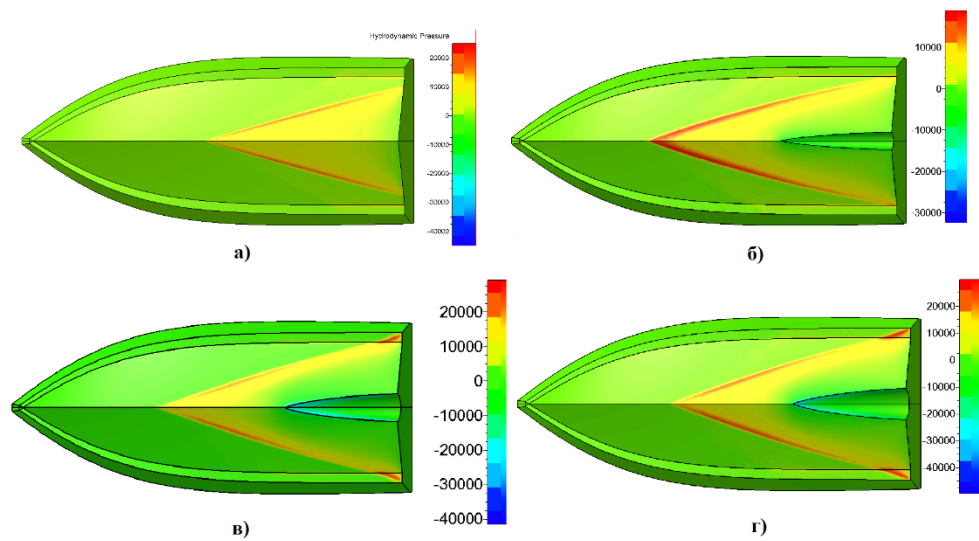


Рис. 13. Распределение гидродинамического давления по поверхности днища катера при скорости 22 м/с: а) D=0 мм; б) D=250 мм; в) D=375 мм; г) D=420 мм.

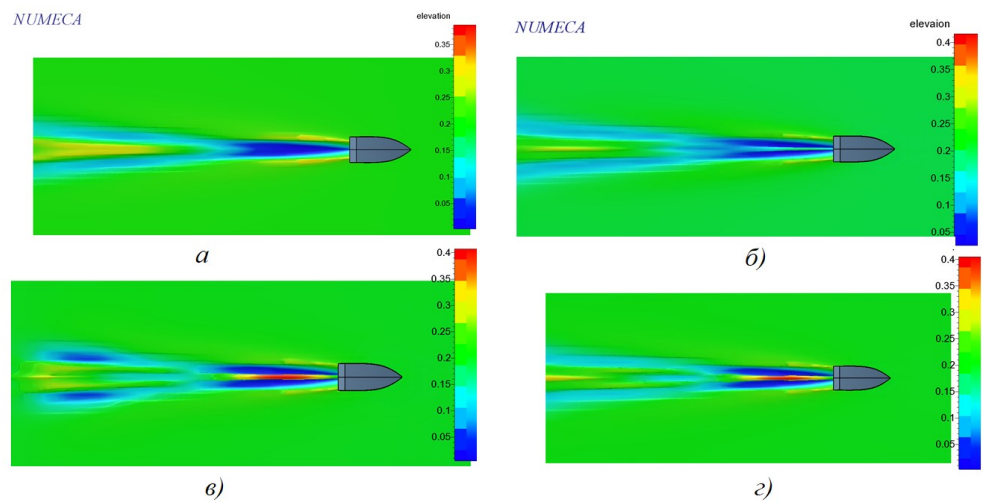


Рис. 14. Волновой след при движении катера со скоростью 22 м/с: а) D=0 мм; б) D=250 мм; в) D=375 мм; г) D=420 мм.

4. Заключение

В статье представлены результаты исследования влияния тоннелей в днище маломерного судна на его гидродинамику методами вычислительной гидродинамики. Использовались тоннели диаметров 250, 375 и 420 мм, результаты моделирования сравнивались с гидродинамическими характеристиками катера без тоннеля.

В результате численного моделирования были получены величины абсолютного сопротивления, изменения осадки и углов дифферента, площади смоченной поверхности.

Результаты численного моделирования показали, что тоннель вносит существенные изменения в гидродинамику маломерного судна, существенно увеличивая сопротивление, и в ряде случаев способствуя снижению осадки и уменьшению углов дифферента. Возможно положительное влияние тоннеля на

опасные режимы маломерных судов, такие как рикошетирующие. Кроме того, генерируемые тоннелями волны могут быть использованы для водных видов спорта.

С другой стороны, полученные результаты исследования показывают, что в общем случае простая интеграция тоннеля простой интеграцией в кормовую часть конкретного маломерного судна не всегда приводит к улучшению его гидродинамических характеристик. Требуется тщательная проработка обводов с учетом всех элементов, которые могут изменять гидродинамику корпуса маломерного судна, в том числе пересмотр компоновки такого судна.

Список литературы

1. Numerical Hydrodynamic of Multihull Tunnel Vessel. Morteza Ghassabzadeh, Hassan Ghassemi. Open Journal of Fluid Dynamics, 2013, 3, 198-204
<http://dx.doi.org/10.4236/ojfd.2013.33025> Published Online September 2013
(<http://www.scirp.org/journal/ojfd>)
2. Ghassabzadeh M, Ghassemi H, Determining of the hydrodynamic forces on the multi-hull tunnel vessel in steady motion, J of the Brazilian Society of Mech. Sci & Eng., 2014, 36(4), 697-708.
3. Numerical Prediction of Hydrodynamic Performance of Planing Trimaran with a Wave-Piercing Bow. Guangsheng Su, Hailong Shen, Yumin Su. Journal of Marine Science and Engineering. Volume 8 Issue 11 Pagination 897 ISSN 2077-1312
4. Roshan, Fatemeh, Abbas Dashtimanesh and Rasul Niazmand Bilandi. "Hydrodynamic characteristics of tunneled planing hulls in calm water." Brodogradnja, 71(1): 19-38.
5. Reza Yousefi, Rouzbeh Shafaghat and Mostafa Shakeri. "High-speed planing hull drag reduction using tunnels". Ocean Engineering, Volume 84 July 2014, Pages 54-60.
6. Hamid Kazemi Moghadam, Rouzbeh Shafaghat. "Numerical Investigation on the Effect of Tunnel Height on Drag Reduction in a High Speed Trimaran". INTERNATIONAL JOURNAL OF MARITIME TECHNOLOG, IJMT Vol.5 Winter 2016 (55-62)
7. Jiangming Ding, Jiabing Jiang. Tunnel flow of a planing trimaran and effects on resistance. Ocean Engineering, Volume 237, October 2021, 109458.
8. Pacurar, Florin, Andreea Mandru and Adham S. Bekhit. "CFD Study on Hydrodynamic Performances of a Planing Hull." Journal of Marine Science and Engineering (2022): n. pag. Sci. Eng. 2022, 10(10), 1523; <https://doi.org/10.3390/jmse10101523>
9. Чебан, Е. Ю. Исследование влияния некоторых особенностей формы корпусов глиссирующих судов на их сопротивление численными методами / Е. Ю. Чебан, Д. В. Никущенко // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. – 2017. – № 48-49. – С. 59-69. – EDN ZULPNP.
10. Исследование влияния формы кормовой оконечности маломерного судна на его гидродинамические характеристики / Е. Ю. Чебан, О. В. Мартемьянова, М. Ю. Поляшова, А. А. Мольков // Научные проблемы водного транспорта. – 2023. – № 76. – С. 75-88. – DOI 10.37890/jwt.vi76.388. – EDN SNYZTL.
11. Земсков, Е. А. Исследование влияния тоннельной кормы на гидродинамику маломерного судна / Е. А. Земсков, К. В. Егорченков, Е. Ю. Чебан // Транспорт. Горизонты развития : Труды 5-го Международного научно-промышленного форума, Нижний Новгород-Новосибирск-Владивосток, 20–23 мая 2025 года. – Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2025. – С. 78. – EDN GVXVNV.
12. Численные методы в механике жидкости: учебное пособие / Д.В. Никущенко. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГМТУ, 2025. – 144 с. ISBN 978-5-88303-720-6

References

1. Numerical Hydrodynamic of Multihull Tunnel Vessel. Morteza Ghassabzadeh, Hassan Ghassemi. Open Journal of Fluid Dynamics, 2013, 3, 198-204
<http://dx.doi.org/10.4236/ojfd.2013.33025> Published Online September 2013
(<http://www.scirp.org/journal/ojfd>)
2. Ghassabzadeh M, Ghassemi H, Determining of the hydrodynamic forces on the multi-hull tunnel vessel in steady motion, J of the Brazilian Society of Mech. Sci & Eng., 2014, 36(4), 697-708.

3. Numerical Prediction of Hydrodynamic Performance of Planing Trimaran with a Wave-Piercing Bow. Guangsheng Su, Hailong Shen, Yumin Su. Journal of Marine Science and Engineering. Volume 8 Issue 11 Pagination 897 ISSN 2077-1312
4. Roshan, Fatemeh, Abbas Dashtimanesh and Rasul Niazmand Bilandi. "Hydrodynamic characteristics of tunneled planing hulls in calm water." Brodogradnja, 71(1): 19-38.
5. Reza Yousefi, Rouzbeh Shafaghat and Mostafa Shakeri. "High-speed planing hull drag reduction using tunnels". Ocean Engineering, Volume 84 July 2014, Pages 54-60.
6. Hamid Kazemi Moghadam, Rouzbeh Shafaghat. "Numerical Investigation on the Effect of Tunnel Height on Drag Reduction in a High Speed Trimaran". INTERNATIONAL JOURNAL OF MARITIME TECHNOLOG, IJMT Vol.5 Winter 2016 (55-62)
7. Jiangming Ding, Jiabing Jiang. Tunnel flow of a planing trimaran and effects on resistance. Ocean Engineering, Volume 237, October 2021, 109458.
8. Pacuraru, Florin, Andreea Mandru and Adham S. Bekhit. "CFD Study on Hydrodynamic Performances of a Planing Hull." Journal of Marine Science and Engineering (2022): n. pag. ar. Sci. Eng. 2022, 10(10), 1523; <https://doi.org/10.3390/jmse10101523>
9. Cheban E.Yu. Study of the effect of a speed boat hull design on water resistance by numerical methods / Cheban E.Yu., Nikuschenko D.V. // "Research Bulletin" by Russian Maritime Register of Shipping – 2017. – № 48-49. – p. 59-69. – EDN ZULPNP.
10. Study of the influence of the vessel stern shape on its hydrodynamic characteristics / Cheban E.YU., Martmianova O.V., Polyashova M.YU., Mol'kov A.A. // Russian journal of water transport – 2023. – № 76. – p. 75-88. – DOI 10.37890/jwt.vi76.388. – EDN SNYZTL.
11. Zemskov E.A. Study of the influence of tunnel aft on the hydrodynamics of light craft / Zemskov E.A., Egorchenkov K.V., Cheban E.Yu. // Transport. Gorizonty razvitiya : Trudy 5-go Mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma, Nizhnij Novgorod-Novosibirsk-Vladivostok, 20–23 maya 2025 goda. – Nizhnij Novgorod: Volzhskij gosudarstvennyj universitet vodnogo transporta, 2025. – S. 78
12. Chislennye metody v mekhanike zhidkosti: uchebnoe posobie / D.V. Nikushchenko. – Sankt-Peterburg: Izd-vo SPbGMTU, 2025. – 144 s. ISBN 978-5-88303-720-6

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Чебан Егор Юрьевич доктор технических наук, доцент, профессор кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности судов, ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта», 603905, Нижний Новгород, Нестерова 5, e-mail: egor.cheban.2@gmail.com

Никущенко Дмитрий Владимирович, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры Прикладной математики и математического моделирования, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, 190121, e-mail: Ndmityr@list.ru

Мольков Александр Андреевич, Старший научный сотрудник, Лаборатория оптических методов (221), Отдел радиофизических методов в гидрофизике (220), «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» 603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46, molkov@ipfran.ru

Egor Yu. Cheban, Dr. Sci. (Eng), assistant professor, professor of Department of Hydrodynamics, Ship Theory and Environment Safety of Ships, Volga State University of Water Transport, 603905, Nizhny Novgorod, Nesterova 5, e-mail: egor.cheban.2@gmail.com

Dmitry V. Nikushchenko, professor, Dr.Sci., professor of department of applied mathematics and mathematical modelling, vice-rector for research, St. Petersburg state marine technical university, Lotsmanskaya st., 3, St. Petersburg 190121, e-mail: Ndmityr@list.ru

Aleksandr A. Mol'kov, Senior Researcher, Optical Methods Laboratory (221), Department of Radiophysical Methods in Hydrophysics (220) Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS) 46 Ulyanov Street, Nizhny Novgorod, 603950, Russia, molkov@ipfran.ru

Статья поступила в редакцию 06.02.2026; принята к публикации 26.02.2026; опубликована онлайн 20.03.2026. Received 06.02.2026; published online 20.03.2026.

СУДОВОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

SHIP POWER EQUIPMENT

УДК 621.438

DOI: 10.37890/jwt.vi86.676

Концептуальные модели идентификации параметров турбины турбокомпрессора судового дизеля

А.Н. Бердник

ORCID: 0000-0003-4043-8085

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия

Аннотация. Рассмотрены основные причины выбора наилучших геометрических параметров термогазодинамической части турбины турбокомпрессора комбинированного судового дизеля, а также оптимального управления рабочими и конструктивными параметрами турбины турбокомпрессора, влияющими на технико-экономические показатели комбинированного судового дизеля. Обозначены подходы к идентификации параметров, характеризующих работу турбины турбокомпрессора – без учета охлаждения турбины и с учетом охлаждения турбины. Показана система уравнений, описывающая процессы в неохлаждаемой и охлаждаемой турбине. Используя теорию подобия, составлена матрица параметров, характеризующих работу турбины с точки зрения вида рабочего тела, термогазодинамического процесса, конструктивных особенностей турбины и режимов ее работы. Представлены возможности управления работой турбины путем изменения геометрии ее проточной части с целью повышения эффективных показателей судового дизеля с газотурбинным наддувом на различных режимах его работы.

Ключевые слова: судовый дизель; турбокомпрессор; турбина; проточная часть; идентификация; управление; теория подобия.

Conceptual models of identification the parameters turbine of turbocharger of marine diesel engine

Aleksey N. Berdnik

ORCID: 0000-0003-4043-8085

Pacific National University, Khabarovsk, Russia

Abstract. The article examines the key factors in selecting the optimal geometric parameters for the thermogasdynamic section of a turbocharger turbine for a combined marine diesel, as well as the optimal control of the turbocharger turbine's operating and design parameters that influence the combined-cycle marine diesel engine's performance. Approaches to identifying the parameters characterizing turbocharger turbine operation are outlined, both with and without turbine cooling. A system of equations describing the processes in an uncooled and cooled turbine is presented. Using similarity theory, a matrix of parameters characterizing turbine operation in terms of the working fluid type, thermogasdynamic process, turbine design features, and operating modes is compiled. Potential for controlling turbine operation by varying the geometry of its flow path is presented, aimed at improving the performance of a turbocharged marine diesel engine in various operating modes.

Keywords: marine diesel engine, turbocharger, turbine, flow path, identification, control, similarity theory.

Введение

Ключевыми компонентами современных судовых дизелей, оснащенных газотурбинным наддувом, являются сам поршневой двигатель внутреннего сгорания и турбокомпрессор. Турбокомпрессор, в свою очередь, объединяет турбину (осевого или радиально-осевого типа) и центробежный компрессор. Форсирование судовых дизелей по среднему эффективному давлению p_{me} за счет газотурбинного наддува обеспечивает качественный рост всех его технико-экономических показателей. Основным условием этого роста является высокая эффективность работы турбины турбокомпрессора. Опыт проектирования турбин агрегатов наддува для поршневых двигателей внутреннего сгорания, их доводки и согласования с поршневой частью двигателя внутреннего сгорания на различных режимах эксплуатации показывает существенное влияние геометрии проточной части турбины, как на КПД турбокомпрессора, так и на эффективные показатели судового дизеля.

Таким образом, без точной оптимизации работы турбины турбокомпрессора под конкретный эксплуатационный режим работы судового дизеля и без возможности управления ее параметрами невозможно обеспечить эффективность рабочего процесса судового дизеля. Поэтому «настройка» турбины под заданные условия эксплуатации судового дизеля и возможность идентификации параметров, характеризующих ее работу, критически важны для обеспечения высоких технико-экономических и экологических показателей судового дизеля в целом.

Исходя из вышеизложенного, целью исследования является отработка теоретических вопросов, связанных с идентификацией параметров охлаждаемой и неохлаждаемой турбины турбокомпрессора судового дизеля с газотурбинным наддувом и управлением параметрами проточной части турбины с целью эффективного использования судового дизеля на различных режимах его эксплуатации.

Результаты исследования

Многопараметровые характеристики судового дизеля, газовой турбины и центробежного компрессора показывают, что каждый из этих элементов имеет достаточно узкую зону наиболее экономичной работы с высоким значением КПД. Для обеспечения наибольшей эффективности судового дизеля с газотурбинным наддувом эти зоны необходимо совместить – согласовать характеристики турбокомпрессора и судового дизеля. Достаточно просто эта задача решается только для номинального и близких к нему режимов или для некоторого выбранного частичного режима, например, режима максимального крутящего момента. Полное согласование компрессора, судового дизеля и газовой турбины при работе на различных режимах возможно только при использовании изменяемой геометрии проточной части турбокомпрессора и фаз газораспределения судового дизеля.

Опыт создания и совершенствования судовых дизелей с газотурбинным наддувом показал нецелесообразность использования центробежных компрессоров с изменяемой геометрией проточной части, а наибольшее внимание было уделено регулированию газовых турбин [1–5]. В настоящее время задача гибкого адаптивного управления рабочим процессом судового дизеля с газотурбинным наддувом не может быть решена без использования турбокомпрессора с изменяемой геометрии проточной части газовой турбины и изменяемых фаз газораспределения судового дизеля. В свою очередь, идентификация параметров газовой турбины является неотъемлемой частью оптимального управления рабочим процессом судового дизеля с газотурбинным наддувом на различных режимах его эксплуатации.

Определение оптимальной конфигурации проточной части турбины турбокомпрессора и выработка наиболее эффективных законов ее управления требуют обязательного применения математического моделирования

эксплуатационных режимов и параметров судового дизеля. В рамках математического моделирования, судовой дизель, оснащённый газотурбинным наддувом, рассматривается как комплексная термогазодинамическая система. Эта система включает в себя последовательность взаимосвязанных компонентов: рабочий цилиндр поршневого двигателя внутреннего сгорания, выпускной трубопровод, турбина, центробежный компрессор, охладитель наддувочного воздуха (если таковой установлен) и впускной трубопровод.

В настоящее время существуют несколько методов математического моделирования рабочего процесса поршневого двигателя внутреннего сгорания (квазистационарный метод, метод характеристик, метод уединенных волн конечной амплитуды). Все они широко представлены в методической и научной литературе [1, 6–8]. Поэтому в настоящей работе они не рассматриваются.

При системном подходе к проектированию систем газотурбинного наддува поршневого двигателя внутреннего сгорания важное место занимает математическое моделирование рабочих процессов, происходящих в турбине, так как в дальнейшем практический успех метода идентификации напрямую коррелирует с уровнем математического моделирования рабочих процессов в турбине.

Рассмотрим две концептуальные модели идентификации параметров турбины турбокомпрессора – без учета охлаждения турбины и с учетом охлаждения турбины.

Первая модель (без учета охлаждения турбины) представляет собой систему уравнений, описывающую процессы в неохлаждаемой турбине, т. е. так называемый квазистационарный метод:

- уравнение энергии

$$\frac{dU_T}{dt} = h_1 \frac{dG_1}{dt} - h_2 \frac{dG_2}{dt};$$

- уравнение расхода (массового баланса)

$$\frac{dG_T}{dt} = \frac{dG_1}{dt} - \frac{dG_2}{dt};$$

- уравнение состояния

$$p_T V_T = G_T R_T T_T,$$

где U_T – полная внутренняя энергия газов в турбине; h_1, h_2 – энтальпия газов соответственно на входе в турбину и на выходе из турбины; G_T – расход газов через турбину; G_1, G_2 – расход газов соответственно на входе в турбину и на выходе из турбины; p_T – давление газов в турбине; V_T – объем проточной части турбины; R_T – газовая постоянная для выпускных газов; T_T – температура газов в турбине.

Так как $U_T = u_T G_T = c_v T_T G_T$, где u_T – удельная внутренняя энергия газов в турбине; c_v – удельная теплоемкость газов в турбине при постоянном объеме, то

$$\frac{dU_m}{dt} = c_v T_m \frac{dG_m}{dt} + c_v G_m \frac{dT_m}{dt} \quad (1)$$

Уравнение расхода (массового баланса) можно представить как

$$\frac{dG_m}{dt} = G'_1 - G'_2 \quad (2)$$

где G'_1 – секундный расход газов на входе в турбину; G'_2 – секундный расход газов на выходе из турбины.

Тогда с учётом (1) и (2) уравнение энергии можно представить в виде

$$c_v T_m (G'_1 - G'_2) + c_v G_m \frac{dT_m}{dt} = h_1 G'_1 - h_2 G'_2 \quad (3)$$

Так как энтальпия газов $h = c_p T$, где c_p – удельная теплоемкость газов при постоянном давлении; T – температура газов, то уравнение (3) после соответствующих преобразований примет вид:

$$\frac{dT_m}{dt} = T_{g_1} k_c \frac{G'_1}{G_m} - T_{g_2} k_c \frac{G'_2}{G_m} - T_m \frac{(G'_1 - G'_2)}{G_m} \quad (4)$$

где k_c – показатель адиабаты для выпускных газов; T_{g_1} – температура газов на входе в турбину; T_{g_2} – температура газов на выходе из турбины.

Расход газов через турбину определяется как

$$G_m = \mu f_T \rho_{g_2} \sqrt{2H_m} \quad (5)$$

где μf_T – эффективное проходное сечение турбины; ρ_{g_2} – плотность газов на выходе из турбины; H_T – адиабатная работа турбины.

Тогда с учётом (5) уравнение (4) можно представить в виде

$$\frac{dT_m}{dt} = T_{g_1} k_c \frac{G'_1}{\mu f_T \rho_{g_2} \sqrt{2H_m}} - T_{g_2} k_c \frac{G'_2}{\mu f_T \rho_{g_2} \sqrt{2H_m}} - T_m \frac{(G'_1 - G'_2)}{\mu f_T \rho_{g_2} \sqrt{2H_m}} \quad (6)$$

Продифференцировав уравнение состояния системы по времени, получим

$$p_m \frac{dV_m}{dt} + V_m \frac{dp_m}{dt} = R_c T_m \frac{dG_m}{dt} + R_c G_m \frac{dT_m}{dt} \quad (7)$$

Так как в турбине $\frac{dV_T}{dt} = 0$, то после соответствующих преобразований уравнение (7) примет вид:

$$\frac{dp_m}{dt} = \frac{R_c T_m}{V_m} \frac{dG_m}{dt} + \frac{R_c G_m}{V_m} \frac{dT_m}{dt} = \frac{p_m}{G_m} \frac{dG_m}{dt} + \frac{p_m}{T_m} \frac{dT_m}{dt} \quad (8)$$

Тогда с учётом (2) и (6) уравнение (8) после соответствующих преобразований можно представить как

$$\begin{aligned} \frac{dp_T}{dt} &= p_T \frac{G'_1 - G'_2}{\mu f_T \rho_{g_2} \sqrt{2H_T}} + p_T \frac{T_{g_1}}{T_T} k_c \frac{G'_1}{\mu f_T \rho_{g_2} \sqrt{2H_T}} - p_T \frac{T_{g_2}}{T_T} k_c \frac{G'_2}{\mu f_T \rho_{g_2} \sqrt{2H_T}} - p_T \frac{G'_1 - G'_2}{\mu f_T \rho_{g_2} \sqrt{2H_T}} = \\ &= p_T \frac{T_{g_1}}{T_T} k_c \frac{G'_1}{\mu f_T \rho_{g_2} \sqrt{2H_T}} - p_T \frac{T_{g_2}}{T_T} k_c \frac{G'_2}{\mu f_T \rho_{g_2} \sqrt{2H_T}} \end{aligned}$$

Таким образом, систему уравнений, описывающую процессы в турбине (квазистационарный метод) можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{dT_T}{dt} = T_{g_1} k_c \frac{G'_1}{\mu f_T \rho_{g_2} \sqrt{2H_T}} - T_{g_2} k_c \frac{G'_2}{\mu f_T \rho_{g_2} \sqrt{2H_T}} - T_T \frac{(G'_1 - G'_2)}{\mu f_T \rho_{g_2} \sqrt{2H_T}} \\ \frac{dp_T}{dt} = p_T \frac{T_{g_1}}{T_T} k_c \frac{G'_1}{\mu f_T \rho_{g_2} \sqrt{2H_T}} - p_T \frac{T_{g_2}}{T_T} k_c \frac{G'_2}{\mu f_T \rho_{g_2} \sqrt{2H_T}} \\ \frac{dG_T}{dt} = G'_1 - G'_2 \end{cases}$$

Основная идея параметрической идентификации заключается в определении неизвестных параметров, которые обычно присутствуют в математических моделях динамических систем. В контексте расчета характеристики турбины турбокомпрессора, ее математическая модель является примером такой динамической системы. Для нахождения точных или приемлемых значений этих параметров проводится идентифицирующий эксперимент, в ходе которого анализируются входные и выходные сигналы системы. Таким образом, возможность определить параметры системы по измерениям ее состояния является критерием ее идентифицируемости.

Характеристики турбин турбокомпрессоров имеют вид $\eta_T = f(\bar{H}_T)$ и $\mu f_T = f(\bar{H}_T)$, где η_T – эффективный КПД турбины; \bar{H}_T – коэффициент напора турбины [2,9].

Из уравнения (5) эффективное проходное сечение турбины можно определить как

$$\mu f_T = \frac{G_T}{\rho_{g_2} \sqrt{2H_T}} = \frac{G_T}{\rho_{g_2} \sqrt{\bar{H}_T u_1^2}},$$

где $H_T = \sqrt{\frac{k_\Gamma}{k_\Gamma - 1} R_\Gamma T_{g_1}^* \left(1 - \left(\frac{p_{g_2}}{p_{g_1}^*} \right)^{\frac{k_\Gamma - 1}{k_\Gamma}} \right)}$; $p_{g_1}^*, T_{g_1}^*$ – давление и температура заторможенного потока газов перед турбиной; p_{g_2} – статическое давление газов за турбиной; u_1 – окружная скорость рабочего колеса турбины на входе; $u_1 = \frac{\pi D_{p.k.T} n}{60}$; $D_{p.k.T}$ – диаметр рабочего колеса турбины; n – частота вращения ротора турбокомпрессора.

Таким образом,

$$\mu f_T = f(G_T, \rho_{g_2}, H_T).$$

На основании формулы Стодола-Флюгеля видно, что изменение G_T обусловлено изменением $p_{g_1}^*, T_{g_1}^*$ и p_{g_2} , т. е.

$$G_T = f(p_{g_1}^*, T_{g_1}^*, p_{g_2}).$$

Давление p_{g_2} обычно принимается равным давлению окружающей среды p_a , т. е. $p_{g_2} = p_a = \text{const}$. Тогда расход газов через турбину будет являться функцией двух параметров, т. е.

$$G_T = f(p_{g_1}^*, T_{g_1}^*).$$

Так как $\rho_{g_2} = \frac{p_{g_2}}{R_\Gamma T_{g_2}}$, то

$$\rho_{g_2} = f(p_{g_2}, R_\Gamma, T_{g_2})$$

или с учетом вышесказанного

$$\rho_{g_2} = f(R_\Gamma, T_{g_2}).$$

Тогда эффективное проходное сечение турбины будет являться функцией пяти параметров, т. е.

$$\mu f_T = f(p_{g_1}^*, T_{g_1}^*, T_{g_2}, R_\Gamma, k_\Gamma).$$

Зависимость эффективного КПД для неохлаждаемых турбин имеет следующий вид [9]:

$$\eta_T = f(M, Re, k_\Gamma),$$

где M – число Маха;

$$M = \frac{\pi D_{p.kT} n}{60 \sqrt{\frac{2k_{\Gamma}}{k_{\Gamma}-1} R_{\Gamma} T_{g1}^* \left(1 - \left(\frac{p_{g2}}{p_{g1}^*}\right)^{\frac{k_{\Gamma}-1}{k_{\Gamma}}}\right)}};$$

Re – число Рейнольдса;

$$Re = \frac{D_{p.kT} c_1 p_{g1}^*}{R_{\Gamma} T_{g1}^* \mu_{\Gamma}};$$

c_1 – абсолютная скорость газов на входе в турбину; μ_{Γ} – коэффициент динамической вязкости газов.

Вторая модель (с учетом охлаждения турбины) представляет собой следующую систему уравнений, описывающую процессы в охлаждаемой турбине:

- уравнение расхода

$$\frac{dG_{\Gamma}}{dt} = \mu_{fT} \rho_{g2} \sqrt{\frac{2k_{\Gamma}}{k_{\Gamma}-1} R_{\Gamma} T_{g1}^* \left(1 - \left(\frac{p_{g2}}{p_{g1}^*}\right)^{\frac{k_{\Gamma}-1}{k_{\Gamma}}}\right)};$$

- уравнение энергии с учетом теплообмена

$$\frac{dL_{\Gamma}}{dt} = c_p T_{g1}^* \left(1 - \left(\frac{p_{g2}}{p_{g1}^*}\right)^{\frac{k_{\Gamma}-1}{k_{\Gamma}}}\right) - \alpha (T_{g1}^* - T_{ст}) F_{\Pi};$$

- уравнение движения

$$\frac{dL_u}{dt} = u_1 c_{1u} + u_2 c_{2u} = \frac{\pi D_{p.kT} n}{60} (c_{1u} + \mu_2 c_{2u}),$$

где α – коэффициент теплоотдачи от газов в стенки турбины; $T_{ст}$ – температура стенки корпуса турбины; F_{Π} – площадь поверхности корпуса турбины; c_{1u} – окружная составляющая абсолютной скорости газа на выходе из соплового аппарата турбины; u_2 – окружная скорость рабочего колеса турбины на выходе; c_{2u} – окружная составляющая абсолютной скорости газа на выходе из рабочего колеса турбины; μ_2 – степень радиальности колеса турбины.

Следует отметить, что решение этих уравнений в общем виде на данный момент затруднительно. Поэтому, при использовании экспериментальных данных, первостепенной задачей становится определение условий, при которых эти результаты могут быть экстраполированы на другие, аналогичные процессы. Теория подобия предлагает решение этой проблемы. Основные принципы применения теории подобия при моделировании термогазодинамических процессов в агрегатах наддува поршневых двигателей внутреннего сгорания представлены в соответствующей литературе [10–12].

Выбор величины безразмерных комплексов – критериев подобия – устанавливается на основании так называемой π -теоремы. При решении задач механики достаточно установить четыре параметра с независимой размерностью: длина L , масса m , время t и температура T . Таким образом, можно составить перечень основных определяющих параметров для охлаждаемой турбины, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные определяющие параметры для охлаждаемой турбины

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Размерность
1	Диаметр рабочего колеса	D_1	L (м)
2	Частота вращения ротора турбокомпрессора	n_{TK}	t^{-1} (мин $^{-1}$)
3	Время	t	t (с)
4	Абсолютная скорость газов на входе в рабочее колесо турбины	c_1	Lt^{-1} (м/с)
5	Полное давление газов на входе в турбину	$p_{g_1}^*$	$L^{-1}mt^{-2}$ (кг/(м · с 2))
6	Температура заторможенного потока газов на входе в турбину	$T_{g_1}^*$	T (К)
7	Давление потока газов на выходе из турбины	p_{g_2}	$L^{-1}mt^{-2}$ (кг/(м · с 2))
8	Газовая постоянная для выпускных газов	R	$L^2t^{-2}T^{-1}$ (м 2 /(с 2 · К))
9	Коэффициент динамической вязкости выпускных газов	μ_r	$mL^{-1}t^{-1}$ (кг/(м · с))
10	Коэффициент теплоотдачи от выпускных газов в стенки турбины	α	$mt^{-3}T^{-1}$ (кг/(с 3 · К))
11	Коэффициент теплопроводности выпускных газов	λ_r	$Lmt^{-3}T^{-1}$ ((кг · м)/(с 3 · К))
12	Удельная теплоемкость выпускных газов при постоянном давлении	c_{p_r}	$L^2t^{-2}T^{-1}$ (м 2 /(с 2 · К))
13	Коэффициент объемного расширения выпускных газов	β_r	T^{-1} (1/К)
14	Температура стенки корпуса турбины	T_{tw}	T (К)
15	Ускорение свободного падения	g	Lt^{-2} (м/с 2)

Некоторые из критериев подобия очевидны:

1. Показатель адиабаты для выпускных газов

$$\pi_1 = c_{p_r}/c_{v_r} = c_{p_r}/(c_{p_r} - R) = k,$$

где c_{p_r} , c_{v_r} – соответственно удельная теплоемкость выпускных газов при постоянном давлении и постоянном объеме.

2. Критерий Маха по окружной скорости рабочего колеса турбины u_1 при $k = \text{const}$

$$\pi_2 = u_1/c_{ад} = (\pi D_1 n_{TK}) / \left(60 \sqrt{\frac{2k}{(k-1)} RT_{g_1}^* \left[1 - \left(\frac{p_{g_2}}{p_{g_1}^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \right) = M,$$

где $c_{ад}$ – условная адиабатная скорость потока газов, соответствующая полному теплоперепаду в турбине H_T .

Остальные девять критериев подобия могут быть найдены независимо друг от друга согласно общей формуле π -теоремы:

1. Критерий Рейнольдса

$$1/\pi_3 = (D_1 c_1 \rho_{g_1}) / \mu_r = (D_1 c_1 p_{g_1}^*) / (RT_{g_1}^* \mu_r) = Re,$$

где ρ_{g_1} – плотность выпускных газов на входе в турбину.

2. Критерий Эйлера

$$\pi_4 = p_{g_2} / (\rho_{g_1} c_1^2) = (p_{g_2} RT_{g_1}^*) / (p_{g_1}^* c_1^2) = Eu.$$

3. Критерий Струхаля

$$\pi_5 = c_1 t / D_1 = \text{Sh.}$$

При расчете турбины критерий Sh учитывается в виде характеристического числа u_1/c_1 , обеспечивающего подобие треугольников скоростей.

4. Критерий Нуссельта

$$\pi_6 = \alpha D_1 / \lambda_\Gamma = \text{Nu.}$$

5. Критерий Прандтля

$$1/\pi_7 = \mu_\Gamma c_{p_\Gamma} / \lambda_\Gamma = \text{Pr.}$$

6. Критерий Фурье

$$\pi_8 = at / D_1^2 = (\lambda_\Gamma t) / (c_{p_\Gamma} \rho_{g_1} D_1^2) = (\lambda_\Gamma t R T_{g_1}^*) / (c_{p_\Gamma} p_{g_1}^* D_1^2) = \text{Fo,}$$

где a – коэффициент температуропроводности; $a = \lambda_\Gamma / c_{p_\Gamma} \rho_{g_1}$.

7. Критерий Пекле

$$1/\pi_9 = c_1 D_1 / a = (c_1 D_1 c_{p_\Gamma} \rho_{g_1}) / \lambda_\Gamma = (c_1 D_1 c_{p_\Gamma} p_{g_1}^*) / (\lambda_\Gamma R T_{g_1}^*) = \text{Re Pr} = \text{Pe.}$$

8. Критерий Стентона

$$\pi_{10} = \alpha / (c_1 c_{p_\Gamma} \rho_{g_1}) = (\alpha R T_{g_1}^*) / (c_1 c_{p_\Gamma} p_{g_1}^*) = \text{Nu/Pe} = \text{St.}$$

9. Критерий Грасгофа

$$1/\pi_{11} = (D_1^3 g \beta_\Gamma (T_{g_1}^* - T_{\text{Тв}}) p_{g_1}^{*2}) / (R^2 T_{g_1}^{*2} \mu_\Gamma^2) = \text{Gr.}$$

Таким образом, можно составить матрицу параметров, характеризующих работу турбины по трем ее направлениям (табл. 2).

Таблица 2

Параметры, характеризующие работу турбины

Критерии подобия	Параметры														
	рабочего тела в турбине						термогазодинамического процесса в турбине					конструкции и режима работы турбины			
	c_{p_Γ}	R	μ_Γ	α	λ_Γ	β_Γ	$p_{g_1}^*$	p_{g_2}	$T_{g_1}^*$	c_1	$T_{\text{Тв}}$	D_1	$n_{\text{ТК}}$	t	
k_Γ															
M															
Re															
Eu															
Sh															
Nu															
Pr															
Fo															
Pe															
St															
Gr															

Заштрихованными областями показаны соответствия конкретного параметра работы турбины определенному критерию подобия:

- параметры рабочего тела в турбине;
- параметры термогазодинамического процесса в турбине;
- параметры конструкции и режима работы турбины.

На основании вышеизложенного можно констатировать, что параметрами состояния турбины или измеряемыми параметрами являются: полное давление газов

на входе в турбину p_{g1}^* , статическое давление газов за турбиной p_{g2} , температура заторможенного потока газов на входе в турбину T_{g1}^* , абсолютная скорость газов на входе в турбину c_1 . Идентифицируемыми параметрами газов в турбине являются: показатель адиабаты для выпускных газов k , удельная теплоемкость газов при постоянном давлении $c_{pг}$, газовая постоянная для выпускных газов R и коэффициент теплоотдачи α . А параметрами управления турбиной являются: диаметр рабочего колеса турбины D_1 и частота вращения ротора турбокомпрессора $n_{тк}$.

В векторной форме матрицу параметров, характеризующих работу турбины (см. табл. 1), можно представить следующим образом:

- вектор параметров $a = [c_{pг}, R_{г}, \mu_{т}, \alpha, \lambda_{г}, \beta]^T = \text{const}$ или $\frac{da}{dt} = 0$;
- вектор состояния $x = [p_{g1}^*, p_{g2}, T_{g1}^*, c_1, T_{ст}]^T$
или $\frac{dx}{dt} = f(p_{g1}^*, p_{g2}, T_{g1}^*, c_1, T_{ст})$;
- вектор управления $u = [D_{п.к.т}, n, t]^T$ или $\frac{du}{dt} = f(D_{п.к.т}, n)$.

Следует отметить, что управление работой турбины при помощи изменения $D_{п.к.т}$ не представляется возможным. Следовательно, если $D_{п.к.т}$ остается неизменным, то появляется возможность гибкого изменения параметров проточной части турбины посредством регулировки углов входа и выхода потока газов в сопловом аппарате и рабочем колесе, а также размеров сопловых лопаток т. д. [1,2,4,5,9,13]. Таким образом, можно адаптировать геометрию проточной части турбины совместно с частотой вращения турбокомпрессора на заданный режим работы поршневого двигателя внутреннего сгорания с целью эффективного его использования на различных режимах эксплуатации.

Заключение

Анализ выполненной работы показывает, что в настоящее время отсутствуют достаточно отработанные математические модели идентификации параметров неохлаждаемой и охлаждаемой турбины турбокомпрессора с учетом специфики ее работы в составе агрегата наддува поршневого двигателя внутреннего сгорания. Несмотря на значительные успехи в современной газодинамической теории, практическое решение ряда задач в областях двигателестроения и турбостроения остаются затруднительными исключительно на теоретическом уровне. Это обусловлено двумя ключевыми факторами: сложной геометрией проточных каналов турбины и нестационарным характером течения потока газов в термогазодинамическом процессе. Анализ результатов обработки экспериментальных данных показывает, что без использования турбокомпрессора с изменяемой геометрией проточной части турбины невозможно достичь наибольшей эффективности и экологичности работы поршневого двигателя с газотурбинным наддувом.

Следует отметить, что полученные результаты нельзя считать окончательными, так как воздействия на геометрию проточной части турбины и, соответственно, ее оптимальное управление, характеризовались значительной долей эмпиризма, определяемой теорией подобия. Исследования на подобных динамических моделях турбин турбокомпрессоров характеризуют один из важных этапов проектирования проточных частей агрегатов наддува поршневых двигателей внутреннего сгорания, обладают определенной самостоятельностью и в то же время, воздействуя на процесс проектирования, приводят к оптимальному решению вопросов, связанных с оптимизацией параметров работы неохлаждаемой и охлаждаемой турбины турбокомпрессора.

Таким образом, можно констатировать, что идентификация параметров и оптимальное управление рабочим процессом турбины турбокомпрессора позволяют эффективно эксплуатировать поршневой двигатель внутреннего сгорания с газотурбинным наддувом в зависимости от реальных условий его эксплуатации.

Список литературы

1. Лашко В.А. Использование фундаментальной теории управления в практике проектирования проточных частей комбинированных двигателей внутреннего сгорания. – Владивосток. Дальнаука, 2009. – 449 с.
2. Межеричкий А.Д. Турбокомпрессоры судовых дизелей. – Л.: Судостроение, 1971. – 191 с.
3. Institution of Mechanical Engineers. 10th International Conference on Turbochargers and Turbocharging. Savoyplace, London. Woodhead Publishing Limited, 2012, 379 p.
4. Пассар А.В., Тимошенко Д.В., Бердник А.Н. Исследования радиально-осевой турбины импульсной системы наддува судового дизеля // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 2-1 (52). С. 74-79. DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.010.
5. Пассар А.В., Тимошенко Д.В. Влияние степени реактивности турбины турбокомпрессора на эффективность ее работы в составе комбинированного ДВС // Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 1-1 (67). С. 88-95. DOI: 10.37220/MIT.2025.67.1.011.
6. Бердник А.Н. Оценка эффективности систем газотурбинного наддува четырехтактных судовых дизелей. – Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2025. – 162, [2] с.
7. Василиев Л.А. Моделирование газодинамических процессов в дизелях. – Хабаровск: Изд-во ХГТУ, 1996. – 131 с.
8. Бердник А.Н., Ремесловский В.О. Математическое моделирование термогазодинамических процессов в поршневых двигателях // Справочник. Инженерный журнал. 2021. № 6. С. 12-17. DOI: 10.14489/hb.2021.06.pp.012-017.
9. Байков Б.П., Бордуков В.Т., Иванов П.В., Дейч Р.С. Турбокомпрессоры для наддува дизелей. Справочное пособие. – Л.: Машиностроение, 1975. – 200 с.
10. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1977. – 440 с.
11. Круглов М.Г. Термодинамика и газодинамика двухтактных двигателей внутреннего сгорания. – М.: Машгиз. 1963. – 272 с.
12. Бердник А.Н. Использование теории подобия при моделировании термогазодинамических процессов в агрегатах наддува поршневых двигателей // Справочник. Инженерный журнал. 2025. № 3. С. 29-35. DOI: 10.14489/hb.2025.03.pp.029-035.
13. Холщевников К.В., Емин О.Н., Митрохин В.Т. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. – М.: Машиностроение. 1986. – 432 с.

References

1. Lashko V.A. Ispol'zovaniye fundamental'noy teorii upravleniya v praktike proyektirovaniya protochnykh chastey kombinirovannykh dvigateley vnutrennego sgoraniya [The use of fundamental control theory in the practice of designing flow sections of combined internal combustion engines]. Vladivostok: Dalnauka Publ, 2009. 449 p. (In Russ).
2. Mezheritsky A.D. Turbokompressory sudovykh dizeley [Turbochargers for marine diesel engines]. Leningrad: Shipbuilding Publ, 1971. 191 p. (In Russ).
3. Institution of Mechanical Engineers. 10th International Conference on Turbochargers and Turbocharging. Savoyplace, London. Woodhead Publishing Limited, 2012, 379 p.
4. Passar A.V., Timoshenko D.V., Berdник A.N. Issledovaniya radial'no-osevoy turbiny impul'snoy sistemy nadduva sudovogo dizelya [Research of the radial-axial turbine of the pulse supercharging system of a marine diesel engine]. Morskiye intellektual'nyye tekhnologii [Marine intelligent technologies]. No. 2-1 (52), 2021. pp. 74-79. (In Russ). DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.010.
5. Passar A.V., Timoshenko D.V. Vliyaniye stepeni reaktivnosti turbiny turbokompressorа na effektivnost' yeye raboty v sostave kombinirovannogo DVS [The influence of the degree of reactivity of the turbocharger turbine on its operating efficiency in a combined internal

- combustion engine]. Morskiye intellektual'nyye tekhnologii [Marine intelligent technologies]. No. 1-1 (67), 2025. pp. 88-95. (In Russ). DOI: 10.37220/MIT.2025.67.1.011.
6. Berdnik A.N. Otsenka effektivnosti sistem gazoturbinnogo nadduva chetyrekhtaknykh sudovykh dizeley [Evaluation of the efficiency of supercharging systems for four-stroke marine diesel engines]. Khabarovsk: Pacific National University, 2025. 162, [2] p. (In Russ).
 7. Vasiliev L.A. Modelirovaniye gazodinamicheskikh protsessov v dizelyakh [Modeling of gas-dynamic processes in diesel engines]. Khabarovsk: Khabarovsk State Technical University, 1996. 131 p. (In Russ).
 8. Berdnik A.N., Remeslovsky V.O. Matematicheskoye modelirovaniye termogazodinamicheskikh protsessov v porshnevnykh dvigatelyakh [Mathematical modeling of thermogasdynamic processes in piston engines]. Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal [Handbook. Engineering journal]. No. 6, 2021. pp. 12-17. (In Russ). DOI: 10.14489/hb.2021.06.pp.012-017.
 9. Baikov B.P., Bordukov V.T., Ivanov P.V., Deich R.S. Turbokompressory dlya nadduva dizeley. Spravochnoye posobiye [Turbochargers for supercharging diesel engines. Reference manual]. Leningrad: Mashinostroenie Publ, 1975. 200 p. (In Russ).
 10. Sedov L.I. Metody podobiya i razmernosti v mekhanike [Methods of similarity and dimensionality in mechanics]. Moscow: Nauka Publ, 1977. 440 p. (In Russ).
 11. Kruglov M.G. Termodinamika i gazodinamika dvukhtaknykh dvigateley vnutrennego sgoraniya [Thermodynamics and gas dynamics of two-stroke internal combustion engines]. Moscow: Mashgiz. 1963. 272 p. (In Russ).
 12. Berdnik A.N. Ispol'zovaniye teorii podobiya pri modelirovanii termogazodinamicheskikh protsessov v agregatakh nadduva porshnevnykh dvigateley [Using the similarity theory in modeling thermogasdynamic processes in piston engine supercharging units]. Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal [Handbook. Engineering journal]. No. 3, 2025. pp. 29-35. (In Russ). DOI: 10.14489/hb.2025.03.pp.029-035.
 13. Kholshchevnikov K.V., Emin O.N., Mitrokhin V.T. Teoriya i raschet aviatsionnykh lopatochnykh mashin [Theory and calculation of aircraft blade machines]. Moscow: Mashinostroenie Publ, 1986. 432 p. (In Russ).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Бердник Алексей Николаевич, к.т.н.,
доцент, доцент высшей школы
промышленной инженерии, Тихоокеанский
государственный университет (ФГБОУ ВО
«ТОГУ»), 680035, г. Хабаровск, ул.
Тихоокеанская, 136, e-mail:
alex.bdk75@yandex.ru

Aleksey N. Berdnik, Ph.D. in Technical
Sciences, Associate Professor of the Higher
School of Industrial Engineering, Pacific
National University, 136 Tikhookeanskaya st,
Khabarovsk, 680035

Статья поступила в редакцию 15.01.2026; принята к публикации 19.02.2026;
опубликована онлайн 20.03.2026. Received 15.01.2026; published online 20.03.2026.

УДК 62.91

DOI: 10.37890/jwt.vi86.668

Расчет и проектирование судовых бокскулеров

С.Н. Валиулин

М.Ю. Храмов

Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. На судах применяют различные способы и системы отведения теплоты от эксплуатирующихся энергетических установок. В процессе эксплуатации судов эксплуатационниками был отмечен быстрый износ механизмов и устройств, охлаждаемых забортной водой, что приводило к частым ремонтам особенно при их работе в прибрежных и морских районах. Судовладельцы несли убытки, связанные с дорогостоящим техническим обслуживанием. В результате сформировалась потребность в уменьшении вредного воздействия солёной воды. Одним из решений - установка теплообменного аппарата в забортный ящик. Целью его монтажа является уменьшение вредного коррозионного воздействия воды на ответственные конструкции и механизмы системы охлаждения главных и вспомогательных двигателей, а также снижению вредного воздействия электрохимической коррозии на ответственные узлы и механизмы, повышая при этом экологическую безопасность. Именно этот фактор и обуславливает использование на современных судах бокскулеров в качестве системы охлаждения. При производстве отечественных изделий взамен импортных необходимо учитывать особенности работы судна и движения среды в теплообменном пространстве. В статье рассмотрены особенности расчета и проектирования судовых бокскулеров. Предложены методы предварительного определения гидравлических характеристик канала, в котором установлен свободно-омываемый теплообменный аппарат. Приведены результаты расчета судового бокскулера.

Ключевые слова: двигатель, теплообменный аппарат, бокскулер, кингстонный ящик, трубный пучок.

Calculation and design of marine box coolers

Sergey N. Valiulin

Michael Y. Khramov

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Various methods and systems are used on ships to remove heat from operating power plants. During the operation of ships, it was observed that the mechanisms and devices cooled by seawater experienced rapid wear and tear, leading to frequent repairs, especially in coastal and marine areas. This resulted in significant costs for shipowners due to the need for expensive maintenance. As a result, there was a need to reduce the harmful effects of saltwater. One solution is to install a heat exchanger in the outboard box. The purpose of its installation is to reduce the harmful corrosive effect of water on critical structures and mechanisms of the cooling system of the main and auxiliary engines, as well as to reduce the harmful effect of electrochemical corrosion on critical components and mechanisms, while improving environmental safety. This is the main reason for using box coolers as a cooling system on modern ships. When producing domestic products to replace imported ones, it is necessary to consider the specific features of the ship's operation and the movement of the medium in the heat exchange space. The article discusses the features of calculating and designing ship box coolers. It proposes methods for preliminary determination of the hydraulic characteristics of a channel in which a free-flowing heat exchanger is installed. The results of calculating a ship box cooler are presented.

Keywords: engine, heat exchanger, box cooler, Kingston box, and tube bundle.

Введение

Встроенные бортовые охладители дизелей в зарубежном и российском судостроении применяются достаточно широко. Причем на российские суда до последнего времени устанавливались, как правило, бокскулеры иностранных фирм. Среди них отметили WEKA, GEA, BLOKSMA, DURAMAX и другие.

В настоящее время поставки зарубежных охладителей резко сократились и возникла задача замены этих аппаратов отечественными. Поскольку расчет и проектирование бокскулеров выполняется самими изготовителями, которые не раскрывают своих методик, необходимо восполнить этот пробел.

Методы

С точки зрения организации процесса теплообмена основная особенность — бокскулеров-это свободное обмывание забортной водой межтрубного пространства.

На рис. 1 схематически показан бокскулер в кингстонном ящике судна. Условно стрелками отмечено направление течения забортной воды.

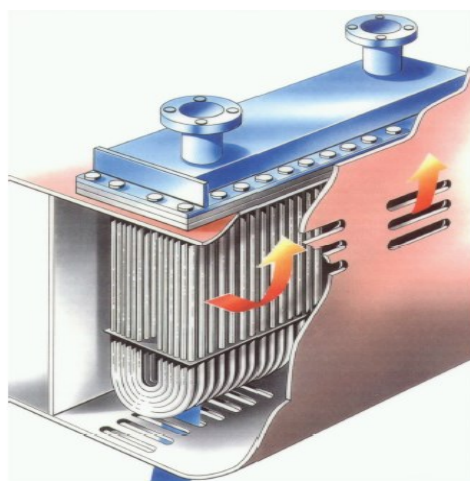


Рис 1. Схема установки бокскулера фирмы WEKA в кингстонном ящике судна

При средней скорости движения судна 20 км/час вода натекает на прорези в днище и борту со скоростью 5,5 м/с, что соответствует скоростному напору 15 кПа. При правильном использовании этого скоростного напора энергии забортной воды более, чем достаточно для организации движения среды в межтрубном пространстве, где скорость поперечного обтекания труб должна составлять 0,3...0,9 м/с. Однако, если прорези в борту и днище не имеют специальной профилировки для создания областей повышенного и пониженного давления, зоны перфорации в области цилиндрической части корпуса судна в днище и борту находятся в практически идентичных условиях. Имеется ввиду стабилизированное течение с примерно одинаковым пограничным слоем, одинаковой турбулентностью и др.

К расчету в этом случае можно принимать волнение, качку судна продольную и поперечную, влияние близкого дна и др. Воздействие этих факторов на порядок ниже скоростного напора. Так же нельзя признать значительными влияние направления прорезей в борту и днище, на что, кстати, обращают внимание производители бокскулеров.

В целом можно рассчитывать на полезное использование только небольшой части скоростного напора. То есть необходимо обеспечивать некоторые очень низкие

значения гидравлического сопротивления проточной части кингстонного ящика для свободного обтекания трубного пучка бокскулера.

На рис. 2 приведено схематическое изображение течения забортной воды в области бокскулеров в кингстонном ящике по данным фирмы BLOKLAND.

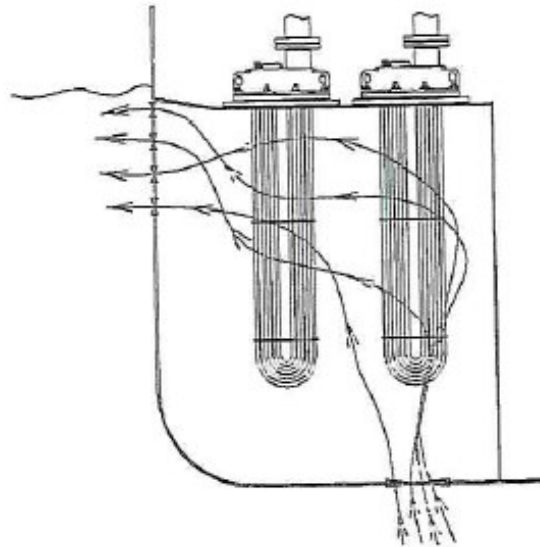


Рис. 2. Схематическое изображение течения забортной воды в канале бокскулеров

Видно, что течение организовано значительно хуже, чем в кожухотрубных аппаратах. Нет четкого поперечного тока. Очень большие обводные течения.

Еще хуже обстоят дела с организацией протока воды на стоянке судна. В этом случае можно рассчитывать только на естественную циркуляцию из-за различных плотностей нагретой в кингстонном ящике и забортной воды. В подтверждение можно привести факты перегрева воды внутреннего контура охлаждения дизель-генераторов на стоянках [1,2]. Хотя, в этом случае движение воды за бортом все-таки есть из-за течения реки.

Переходя к задаче теплового расчета бокскулера, отметим, что в числе условий должны быть известны не менее трех температур теплоносителей и массовые расходы протекающих через трубную систему сред и влияние на экологические показатели двигателя [3,4,5,6,7].

Что касается расхода охлаждаемой среды, то она определяется работой циркуляционного насоса. По части расхода забортной воды через бокскулер отметим – это отдельная задача гидродинамики. Это же и относится к температуре забортной воды в трубной системе.

Задача совместного решения системы уравнений гидродинамики и теплопередачи в данной сложной системе проточной части канала кингстонного ящика и трубного пучка бокскулера требует вычислительных средств чрезвычайно большой мощности и быстродействия.

На первом этапе определим параметры режимов и граничных условий, чтобы на этой базе выполнить ориентировочные расчеты без 3D моделирования.

Схематически представим систему проточной части кингстонного ящика в виде канала, в котором расположен бокскулер, занимающий долю сечения проточной части рис. 3.

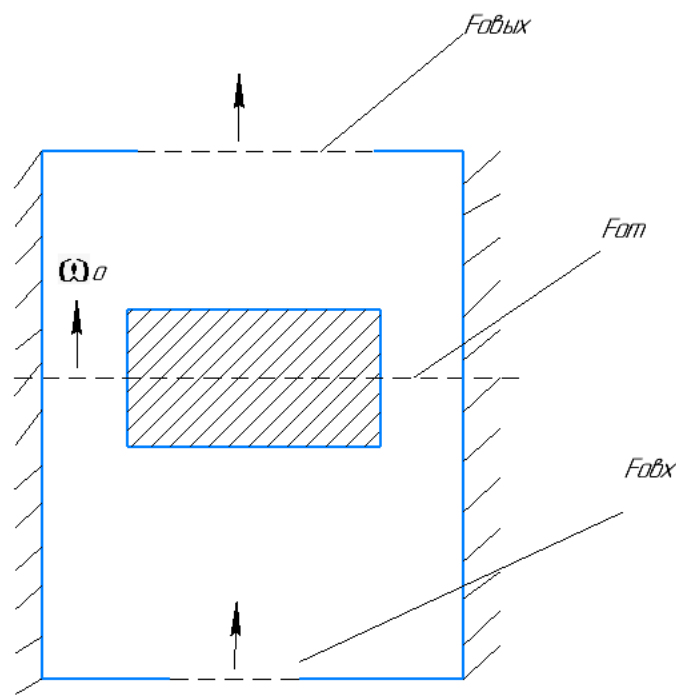


Рис. 3. Расчетная схема проточной части кингстонного ящика

$F_{овх}$ - площадь входных окон на днище

$F_{от}$ – площадь сечения между стенками ящика бокскулером

$F_{овых}$ - площадь выходных окон на борту

Сопротивление течения вокруг бокскулера пренебрежимо мало в сравнении с гидравлическим сопротивлением пучка труб в 15...40 рядов. Скорость течения вокруг бокскулера ω в сечении площадью. На входе в канал система щелей с площадью $F_{овх}$ на выходе $F_{овых}$.

Зададим часто встречающиеся соотношения площадей:

$$F_{овых}/F_o=0,4; F_{овых}/F_o=0,2; F_{овых}/F_o=0,5$$

где F_o -сечение свободного канала. Рассчитаем коэффициенты сопротивления диафрагм в канале по данным [8,9].

Сопротивление бокскулера так же определим как сопротивление тела в канале [1,2].

На данном этапе неизвестно значение средней температуры в кингстонном ящике, соответственно, не известен напор естественной циркуляции.

Примем по известным образцам разность высот выходных и входных щелей 2,0 м.

Рассмотрим три варианта разности температур забортно й воды и воды в кингстонном ящике: 20,40,60°C.

$$\Delta P = gH(Q_{зб} - Q_{кя}), \tag{1}$$

Рассчитываем напор циркуляции для этих разностей по формуле (1):

где $g=9.81 \text{ м/с}^2$ -ускорение силы тяжести;

H , м-разность высот;

$Q_{зб}$, $Q_{кя}$ - кг/м³-плотность воды за бортом и в кингстонном ящике соответственно.

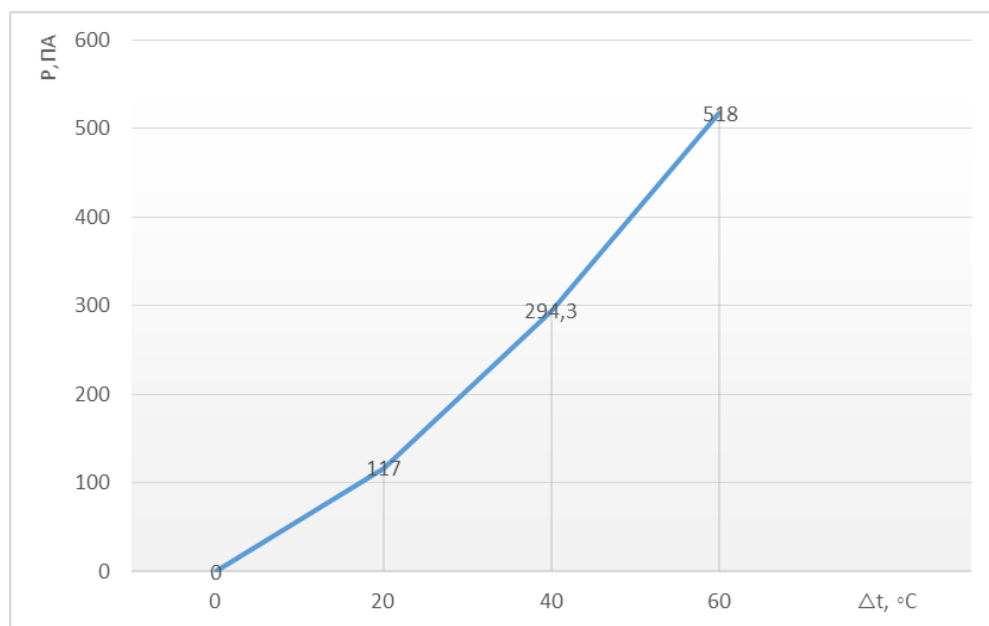


Рис. 4. Напор циркуляции в канале кингстонного ящика

Для этих напоров циркуляции подсчитаны скорости обтекания бокскулера рис. 5.

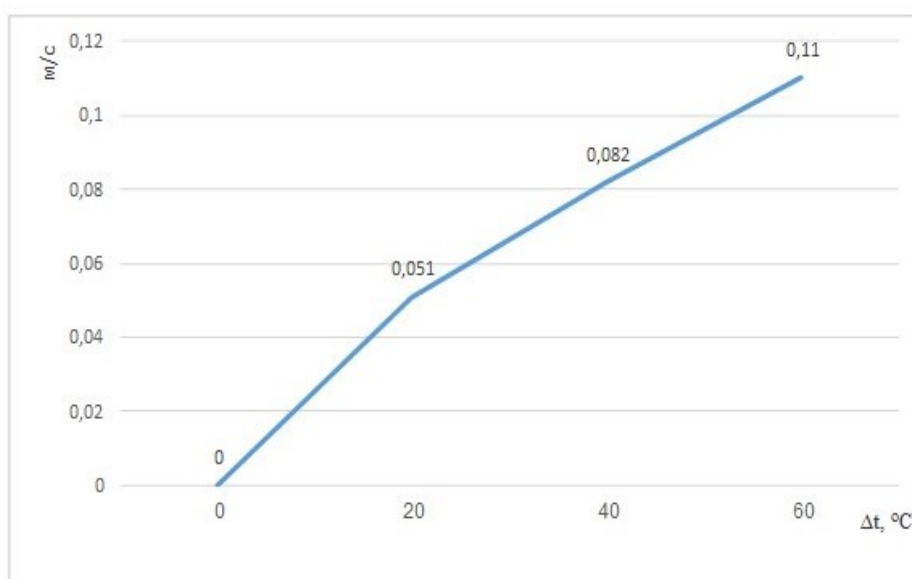


Рис. 5. Скорость течений забортной воды при естественной циркуляции в свободном сечении вокруг бокскулера

Таким образом, для самого неблагоприятного режима эксплуатации бокскулера на стоянке при организации течения только благодаря естественной циркуляции можно ожидать скоростей восходящих потоков вне бокскулера в соответствии с данными графика рис. 5.

На практике значения температуры воды в кингстонном ящике находятся в пределах 35...45°C. При средней величине 40°C и температуре забортной воды 20°C разность температур равна 20°C. Соответственно, скорость свободной циркуляции вне пучка труб не больше 0,05 м/с.

Без численного моделирования течения внутри трубной системы говорить о скорости движения воды между трубками невозможно. Но можно считать, что эта скорость будет не выше 0,05 м/с.

Для бокскулеров GEA Bloksma B.V. произведен обратный тепловой расчет с определением проектного значения скорости поперечного обтекания трубных пучков, обеспечивающего паспортный теплосъем.

Расчет выполнялся по методике, изложенной в справочнике [10].

Получены значения минимальной расчетной скорости поперечного обтекания пучков труб в пределах 0,02...0,08 м/с. Этот результат коррелируется с данными рис. 5.

Понятно, что скорость поперечного тока в трубном пучке зависит от множества факторов, в том числе густоты пучка, количества рядов труб, режима течения и т.д. Но она однозначно меньше 0,05 м/с.

Мы условно приняли среднюю скорость обтекания труб 0,02 м/с. Это дает уверенность, что спроектированный под такую низкую скорость бокскулер не будет недоразмерен.

Проектный расчет выполнялся по формулам [10,11,12]. Средний температурный напор $\Delta t_{ср}$ определялся по формуле 4,2-6 справочника [10].

Результаты расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1

Типоразмер		Охладитель проточный одноконтурный ОП.К-6.10.27.1500	
Теплоноситель		Горячий	Холодный
Условный диаметр патрубков, мм		100	—
Вид теплоносителя		Вода пресная	Вода морская
Расход		47904,0 кг/ч (48,0 м ³ /ч при 20 °С)	—
Температура на входе	°С	56,0	32,0
Температура на выходе	°С	38,0	—
Гидравлическое сопротивление	кПа	26,50	—
Расчетная мощность	кВт	1000	
Запас площади теплообменной поверхности на загрязнения		27...30 % (в зависимости от материала теплообменных труб)	
Площадь теплообменной поверхности по наружному диаметру теплообменных труб	м ²	83,7	
Скорость судна	узел	не менее 3,0	
Расчетная температура	°С	95,0	
Расчетное/пробное давление	МПа	0,35 / 0,53	
Масса теплообменника без жидкостей	кг	950	
Вместимость полостей	л	207	—
Материалы доска трубная трубки теплообменные перегородки камера водяная		латунь ЛО62-1 Мельхиор МНЖМц10-1-1 (заменитель – CuNi90-10, CuNi10Fe1Mn) медь М3 сталь углеродистая	

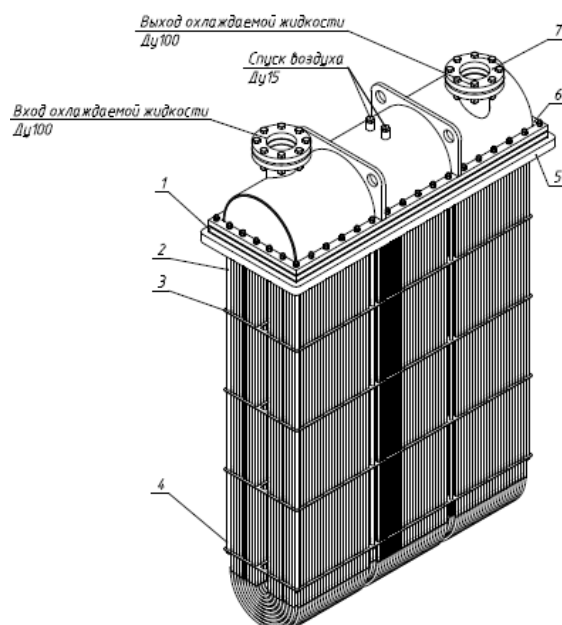


Рис. 6. Чертеж общего вида судового охладителя погружного типа

Фото изготовленного охладителя перед испытаниями приведено на рис 7.

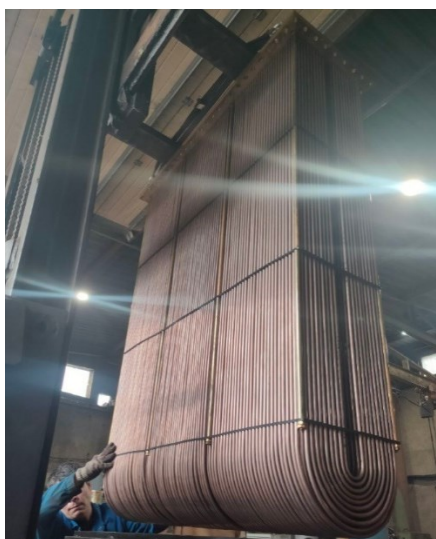


Рис. 7. Общий вид погружного охладителя

Результаты

По результатам работы сделаны следующие выводы:

- массогабаритные характеристики бокскулера на 50...100% превышают эти же показатели кожухотрубных аппаратов;
- основная причина переразмеривания бокскулеров-низкие скорости охлаждающей воды по межтрубному пространству в сочетании со значительной неравномерностью течения воды по фронту теплообменного аппарата;

– для значительного повышения точности тепловых и гидравлических расчетов бокскулеров необходимо использование численных методов расчета с решением систем управлений гидродинамики и теплопередачи в 3D постановке для трубной системы и канала кингстонного ящика в комплексе.

Список литературы

1. Рыжков А.В. О работе «ледовых ящиков» ледоколов на мелководье [Текст] / А.В.Рыжков, К.Е. Сазонов // Избр. докл. 4-й Сахалинской НТК Мореходство и морские науки — 2012 — Южно-Сахалинск, 2013 — С. 223-226.
2. Харламова, А.Э., Покусаев М.Н., Трифонов А.В. (2023). Вестник астраханского государственного технического университета. серия: Морская техника и технология. судостроение, судоремонт и эксплуатация флота № 2,2023, 30-40. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2023-2-30-40>
3. ГОСТ 19439.3-74 Судовые эксплуатационные документы. Типовая номенклатура документов для морских судов и судов внутреннего плавания
4. (с Изменениями N 1, 2, 3).
5. ГОСТ 24166-80 Система технического обслуживания и ремонта судов. Ремонт судов. Термины и определения.
6. Матвеев, Ю.И. Особенности напрессовки облицовок гребных валов / Ю.И. Матвеев, В.А. Орехво, М.Ю. Храмов, А.В. Орехво // Вестник ВГАВТ. 2019. № 60. С. 232–237.
7. Российское Классификационное Общество. Правила классификации и постройки судов - Москва: 2024. – 1726 с.
8. Медведев, Г.В., Храмов, М.Ю. Воздействие температуры отработавших газов судовых энергетических установок на качество их очистки с использованием метода каталитической нейтрализации / Медведев, Г.В., Храмов, М.Ю.// Научные проблемы водного транспорта, (62), 167-174. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.47>
9. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям Т.1.М: Машиностроение 1992г. С 165-166.
10. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям Т2. М; Машиностроение, 1992. С 254.
11. Бажан, П.И. Проектирования и расчет теплообменных аппаратов/ Бажан П.И., Исваев С.Е., Сорокин О.Г.- Н. Новгород: Изд-во 2 Печатный дом Василия Миронова; 2017г- 438с.
12. Лаптев, А.Г. Гидромеханические процессы в нефтехимии и энергетике: Пособие к расчету аппаратов / Лаптев А.Г., Фарахов М.И.-Казань: Изд-во Казанского гос. Ун-та, 2008-729с.
13. Гринев, Е. В., Валиулин, С. Н., Хлыбов, А. А., & Матвеев, Ю. И. (2023). Вопросы технологии лазерной сварки концов теплообменных труб в трубных решетках. Научные проблемы водного транспорта, (77), 79-90. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi77.416>

References

1. Ryzhkov A.V. O rabote «ledovykh yashchikov» ledokolov na melkovod'e [Tekst] / A.V. Ryzhkov, K.E. Sazonov // Izbr. dokl. 4-i Sakhalinskoi NTK Morekhodstvo i morskije nauki — 2012 — Yuzhno-Sakhalinsk, 2013 — S. 223-226.
2. Kharlamova, A.Eh., Pokusaev M.N., Trifonov A.V. (2023). Vestnik astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. sudostroenie, sudoremont i ehkspluatatsiya flota № 2,2023, 30-40. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2023-2-30-40>
3. GOST 19439.3-74 Sudovye ehkspluatatsionnye dokumenty. Tipovaya nomenklatura dokumentov dlya morskikh sudov i sudov vnutrennego plavaniya (s Izmeneniyami N 1, 2, 3).
4. GOST 24166-80 Sistema tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta sudov. Remont sudov. Terminy i opredeleniya.
5. Matveev, YU.I. Osobennosti napressovki oblitsovok grebnykh valov / YU.I. Matveev, V.A. Orekhvo, M.YU. Khramov, A.V. Orekhvo // Vestnik VGAVT. 2019. № 60. S. 232–237.

6. Rossiiskoe Klassifikatsionnoe Obshchestvo. Pravila klassifikatsii i postroiki sudov Moskva: 2024. – 1726 s.
7. Medvedev, G.V., Khramov, M.YU. Vozdeistvie temperatury otrabotavshikh gazov sudovykh ehnergeticheskikh ustanovok na kachestvo ikh oчитки s ispol'zovaniem metoda kataliticheskoi neitralizatsii / Medvedev, G.V., Khramov, M.YU.// Nauchnye problemy vodnogo transporta, (62), 167-174. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.47>
8. Idel'chik, I.E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam T.1.M: Mashinostroenie 1992g. S 165-166.
9. Idel'chik, I.E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam T2. M; Mashinostroenie, 1992. S 254.
10. Bazhan, P.I. Proektirovaniya i raschet teploobmennykh apparatov/ Bazhan P.I., Isvaev S.E., Sorokin O.G.- N. Novgorod: Izd-vo 2 Pечатnyi dom Vasiliya Mironova; 2017g-438s.
11. Laptev, A.G. Gidromekhanicheskie protsessy v neftekhimii i ehnergetike: Posobie k raschetu apparatov / Laptev A.G., Farakhov M.I.-Kazan': Izd-vo Kazanskogo gos. Un-ta, 2008-729s.
12. Grinev, E. V., Valiulin, S. N., Khlybov, A. A., & Matveev, YU. I. (2023). Voprosy tekhnologii lazernoй svarki kontsov teploobmennykh trub v trubnykh reshetkakh. Nauchnye problemy vodnogo transporta, (77), 79-90. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi77.416>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Валиулин Сергей Николаевич, ООО «Гидротермаль» г. Нижний Новгород, Россия к.т.н., технический директор ООО «Гидротермаль» 603163, Нижний Новгород, ул. Набережная Гребного Канала, 6, e-mail: snval.54@yandex.ru

Храмов Михаил Юрьевич, к.т.н., доцент, доцент кафедры Эксплуатации судовых энергетических установок, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: m.u.hramov@yandex.ru

Sergey N. Valiulin, Hydrothermal LLC, Nizhny Novgorod, Russia PhD., Technical Director of Hydrothermal LLC 603163, Nizhny Novgorod, Naberezhnaya Grebnogo Kanala, 6, e-mail: snval.54@yandex.ru

Mikhail Y. Khramov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951, e-mail: m.u.hramov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 27.06.2025; принята к публикации 22.12.2025; опубликована онлайн 20.03.2026. Received 27.06.2025; published online 20.03.2026.

УДК 62-551.4

DOI: 10.37890/jwt.vi86.683

Влияние настроечных параметров регулятора частоты вращения на переходный процесс

А.А. Панасенко

ORCID: 0000-0003-2067-884X

С.В. Петрашёв

ORCID: 0000-0003-3183-5150

Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, г. Владивосток, Россия

Аннотация: Рассмотрены вопросы регулирования частоты вращения судовых главных двигателей при синусоидальном изменении момента сопротивления на валу. Заданы внешние условия режима нагрузки главного двигателя по максимальному значению и периоду колебаний. Указаны отрицательные факторы для судна и двигателя вследствие периодических колебаний нагрузки. Также проанализированы процессы при скачкообразном изменении задания на регулятор частоты вращения. Представлены переходные процессы при различных настроечных параметрах ПИД-регуляторов. Для сравнительного анализа переходных процессов взяты три различные области устойчивых процессов диаграммы Вышнеградского.

Ключевые слова: ветровые волны, синусоидальные колебания, настроечные параметры, колебательный процесс, аperiodический процесс, диаграмма Вышнеградского, метод настройки Зиглера-Никольса.

The influence of speed controller settings on the transitional process

Andrey A. Panasenko

ORCID: 0000-0003-2067-884X

Sergey V. Petrashev

ORCID: 0000-0003-3183-5150

Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoi, Vladivostok, Russia

Abstract: The issues of regulating the rotational speed of marine main engines with a sinusoidal change in the moment of resistance on the shaft are considered. The external conditions of the main engine load mode are set according to the maximum value and the oscillation period. Negative factors for the vessel and the engine due to periodic load fluctuations are indicated. The processes are also analyzed in case of a sudden change in the speed control setting. Transients are presented for various tuning parameters of PID controllers. For a comparative analysis of transient processes, three different areas of stable processes of the Vyshnegradsky diagram are taken.

Keywords: wind waves, sinusoidal oscillations, tuning parameters, oscillatory process, aperiodic process, Vyshnegradsky diagram, Ziegler-Nichols tuning method

Введение

Морские перевозки всегда связаны с непростыми условиями. Суда выполняют свою работу при сильном волнении, в шторм или, даже, в ураган. Несмотря на такие опасности, современные суда продолжают следовать своим маршрутам, не отклоняясь от графика. Штормы – неизбежная часть проблем при перемещении различных судов [1].

Основным типом главных двигателей на морских судах являются двигатели внутреннего сгорания, мощность которых достигает 80000 кВт. Скорость судна с механическим двигателем при сильных попутных ветрах снижается. Основной причиной этого является сопротивление движению судна, вызванное волнением и ухудшением работы гребного винта [2]. При слабом встречном ветре судно мало теряет скорость, при сильном – ход уменьшается из-за дополнительного сопротивления, вызванного волнением. Сопротивление движению на волнении возрастает с увеличением амплитуд килевой и вертикальной качки. Периоды установившихся ветровых волн могут быть от 0,33 с (скорость ветра от 0,5 до 1,5 м/с) до 18 с (скорость ветра от 32 м/с) [1].

Периодическое оголение винта и перебой в работе ускоряют износ двигателя, изменяют режим плавания судна [5]. Возмущающим воздействием на двигатель при нахождении судна в море могут быть синусоидальные колебания.

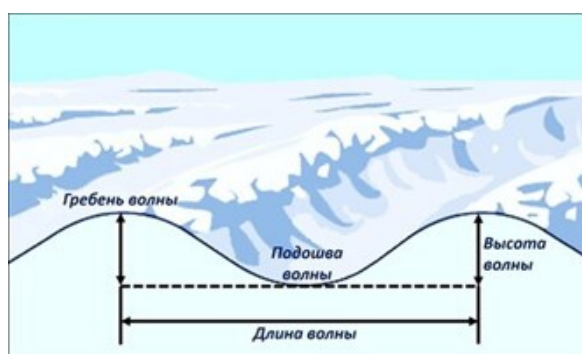


Рис. 1. Синусоидальная волна

В океане чаще всего встречаются волны длиной 90-100 м, высотой 4-5 м и периодом 7-9 с. Самые длинные из наблюдавшихся волн – 900 м (высота 18-20 м). Для правильного маневрирования на взволнованном море необходимо объективно оценивать степень волнения. Волнение оценивается в баллах в зависимости от высоты волны.

Сопротивление движению судна увеличивается при ветре и волнении моря. В Северной Атлантике, при силе ветра до 6 баллов, это увеличение достигает в среднем 22-25%. При плавании на волнении амплитуды колебаний упора и момента на винте находятся в линейной зависимости от высоты волны [1]. Согласно [2] изменение упора и момента гребного винта при килевой качке происходит от 2% до 15% для упора и от 2% до 13% для момента гребного винта [3].

При резком увеличении сопротивления движению судна от ветра и волн, частота вращения коленчатого вала обычно не превышает 25-40% от номинальной, двигатель работает неустойчиво и может заглохнуть [4, 5, 6].

Постановка задачи

В связи с большим влиянием колебаний момента сопротивления на частоту вращения гребного винта представляется целесообразным рассмотреть процесс совместной работы главного двигателя и регулятора частоты вращения с различными моделируемыми настроечными параметрами. При этом возмущающим фактором возникновения переходного процесса будет являться синусоидальный момент сопротивления на валу двигателя. Кроме этого, необходимо рассмотреть работу двигателя и регулятора при скачкообразном изменении настройки с выбором оптимальных настроечных параметров регулятора.

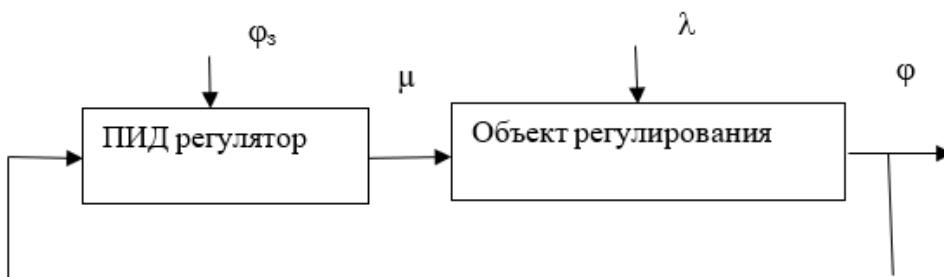


Рис. 2. Система автоматического регулирования частоты вращения главного двигателя

Уравнение объекта регулирования (рис. 2)

$$T_o \frac{d\varphi}{dt} + \varphi = k_o \mu - k_\lambda \lambda, \quad (1)$$

уравнение регулятора частоты вращения (рис. 2)

$$T_p \frac{d\mu}{dt} + \mu = k_p \left[(\varphi_3 - \varphi) + \frac{1}{T_i} \int (\varphi_3 - \varphi) dt + T_d \frac{d(\varphi_3 - \varphi)}{dt} \right], \quad (2)$$

где φ – относительное отклонение частоты вращения; φ_3 – относительное отклонение задания частоты вращения;

μ – относительное отклонение регулирующего органа;

λ – относительное отклонение нагрузки на двигатель;

T_o, T_p – постоянные времени объекта регулирования и регулятора;

k_p, T_i, T_d – настроечные параметры регулятора (коэффициент усиления регулятора, время интегрирования, время дифференцирования).

Уравнение относительной нагрузки

$$\lambda = \lambda_m \sin(\omega t), \quad (3)$$

где λ_m – максимальное значение синусоидальной нагрузки;

ω – циклическая частота, равная $\omega = \frac{2\pi}{T}$, где T – период колебаний;

t – время.

Примем $T_o=1$; $k_o=1$; $k_\lambda=1$; $T_p=0,5$ с;

настроечные параметры регулятора – изменяемые.

Необходимо исследовать влияние настроечных параметров на переходные характеристики при синусоидальном изменении нагрузки при максимальном изменении амплитуды на 10% и периоде колебаний нагрузки 17 с. Также необходимо исследовать влияние настроечных параметров на переходные характеристики при резком (скачкообразном) изменении настройки для выбранного уровня (на 10%).

Основная часть

Передаточная функция по нагрузке при неизменном задании на регулятор

$$W(p) = \frac{\varphi}{\lambda} = \frac{k_\lambda (T_p p + 1) T_i p}{T_o T_p T_i p^3 + (T_p T_i + T_o T_i + k_o k_p T_d T_i) p^2 + (T_i + k_o k_p T_i) p + k_o k_p} \quad (4)$$

Необходимо выяснить какие процессы (чисто апериодические, апериодические с мелкими колебаниями, чисто колебательные) будут наиболее подходящими для поддержания частоты вращения при вынужденных колебаниях момента сопротивления движению судна.

Используя диаграмму Вышнеградского (рис. 3), выберем такие параметры регулятора, при которых координаты диаграммы попадут в зону аperiодических процессов [7, 8].

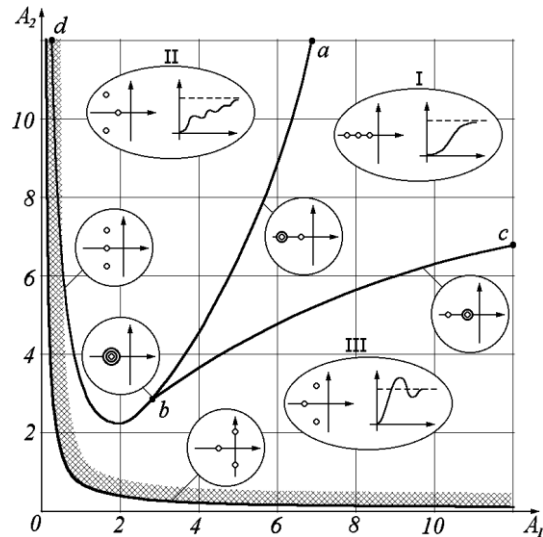


Рис. 3. Диаграмма Вышнеградского

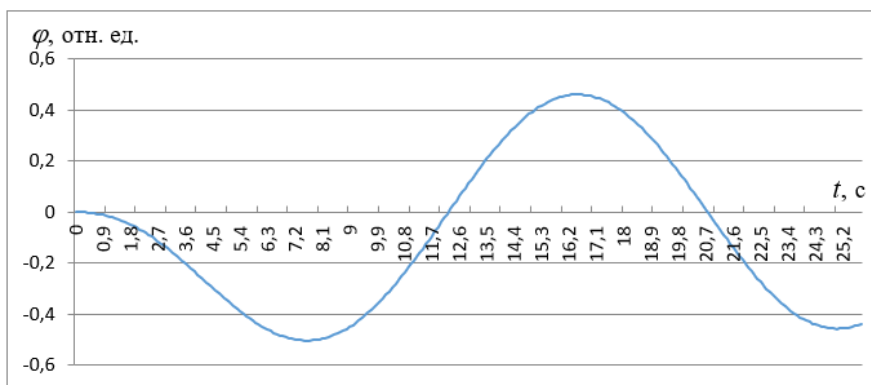
Для построения переходного процесса и расчёта значений координат Вышнеградского использована программа Microsoft Excel. Необходимые для расчёта данные занесены в таблицу 1 (п. 1).

Зависимости относительного отклонения регулируемой величины от времени и относительного отклонения регулирующего органа от времени представлены на рис. 4.

Используем передаточную функцию по нагрузке (4) и добиваемся значений корней характеристического уравнения чисто отрицательных без мнимой части с помощью источника [11]. Переходный процесс на рис. 4 наблюдается с колебаниями с большим перерегулированием (50% заданной частоты вращения) и с периодом колебаний 17 с, таким же, как исходная волна.

По диаграмме Вышнеградского (рис. 3), выберем такие параметры регулятора, при которых координаты диаграммы попадут в зону затухающих колебательных процессов (табл. 1, п. 2). Также используем передаточную функцию по нагрузке (4) и добиваемся значений корней характеристического уравнения с отрицательной вещественной частью, из них два корня имеют комплексно сопряжённые мнимые части и меньшие по модулю вещественные части по сравнению с третьим корнем [11].

а)



б)

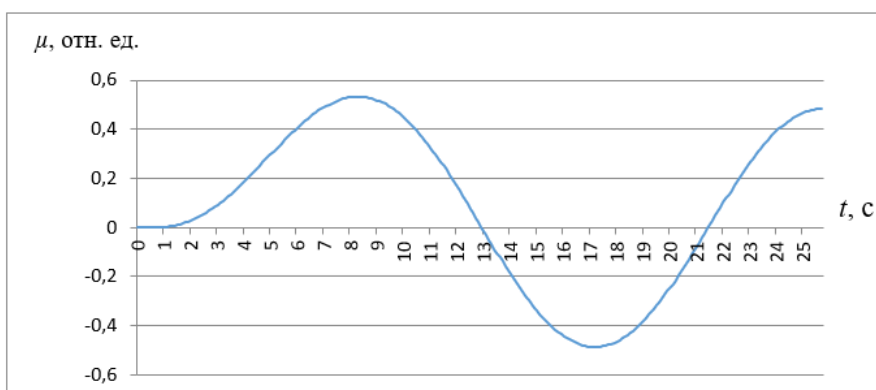


Рис. 4. Переходные процессы регулируемого параметра (а) и регулирующего органа (б) при которых координаты диаграммы Вышнеградского попадают в зону аperiodических процессов

Анализируя переходный процесс на рис. 5, наблюдаем колебания с перерегулированием, меньшим, чем на рис. 4 (22% заданной частоты вращения) и с периодом колебаний 17 с, таким же, как заданная волна.

Используя диаграмму Вышнеградского (рис. 3), выберем такие параметры, при которых координаты диаграммы попадут в зону затухающих аperiodических процессов с небольшими колебаниями (табл. 1, п. 3). Также используем передаточную функцию по нагрузке (4) и добиваемся значений корней характеристического уравнения с отрицательной вещественной частью, из них два корня имеют комплексно сопряжённые мнимые части и большие по модулю вещественные части по сравнению с третьим корнем [11].

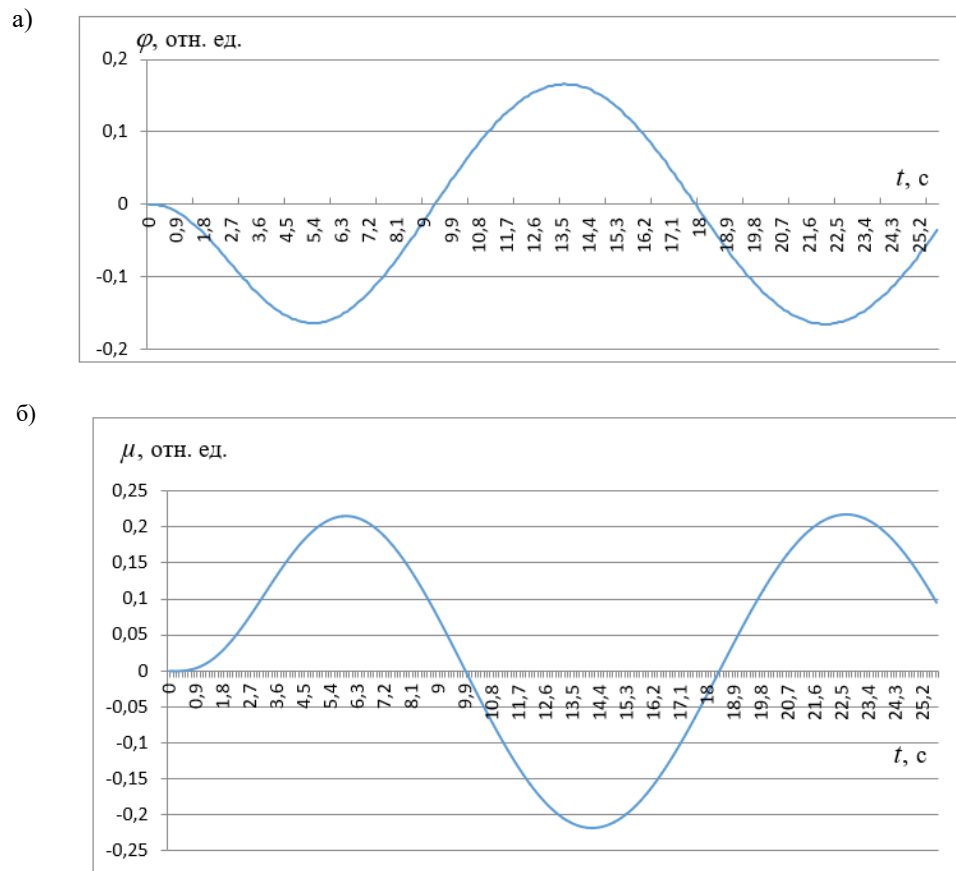
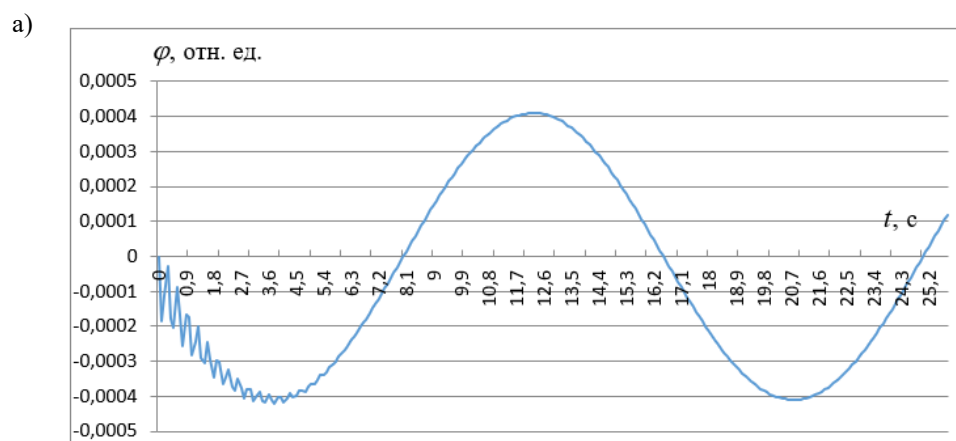


Рис. 5. Переходные процессы регулируемого параметра (а) и регулирующего органа (б) при которых координаты диаграммы Вышнеградского попадают в зону колебательных процессов

Анализируя переходный процесс на рис. 5, наблюдаем колебания с перерегулированием, меньшим, чем на рис. 4 (0,04% заданной частоты вращения) и с периодом колебаний 17 с, таким же, как заданная волна.



б)

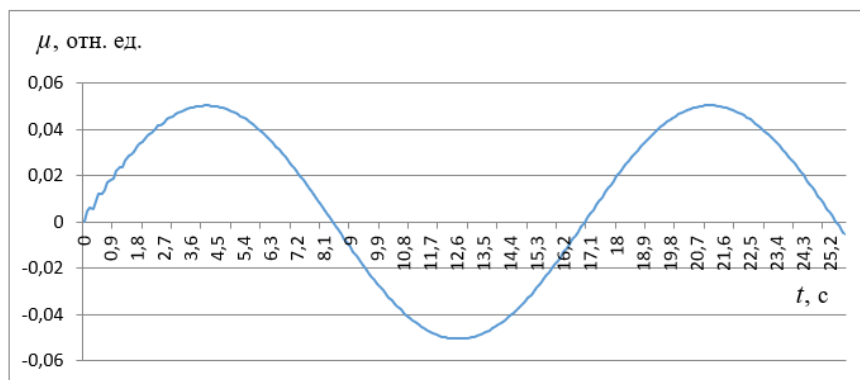
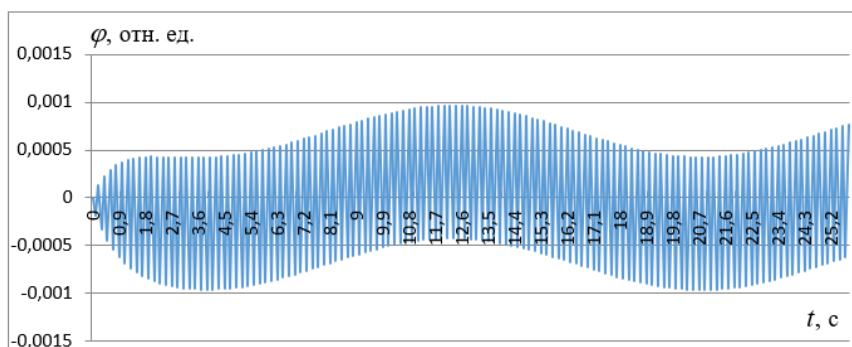


Рис. 6. Переходные процессы, при которых координаты диаграммы Вышнеградского попадают в зону процессов с небольшими колебаниями
а – регулируемого параметра, б – регулирующего органа

С целью определения оптимальной настройки регулятора, воспользуемся эмпирическим методом настройки параметров ПИД-регулятора Зиглера-Никольса [9]. Для этого отключаем дифференциальную и интегральную составляющие закона регулирования и увеличиваем коэффициент усиления регулятора до появления незатухающих колебаний. Параметры представлены в таблице 1, п. 4.

Критический коэффициент усиления принят 189, критический период колебаний равен 2с, результаты расчета представлены на рис. 7.

а)



б)

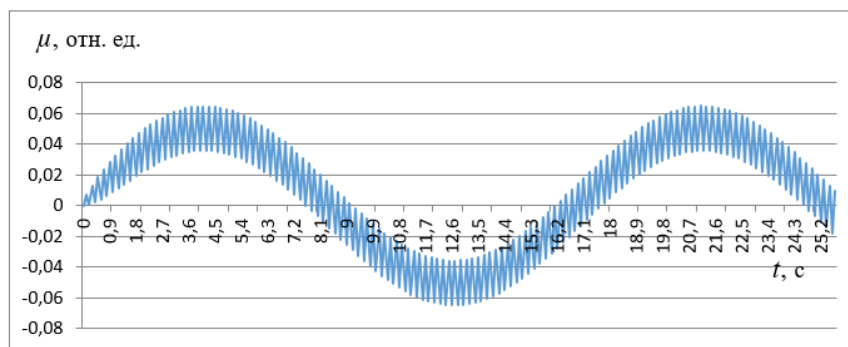


Рис. 7. Переходные процессы, при которых возникают незатухающие колебания регулируемого параметра
а – регулируемого параметра, б – регулирующего органа

С целью сравнения П-регулятора с ПИД-регулятором, найдём коэффициент усиления, равный половине от критического и находим переходные процессы для регулируемого параметра и регулирующего органа. Параметры представлены в таблице 1, п. 5, а графики переходного процесса на рис. 8.

Заданы параметры для оптимизированного процесса по методу Зиглера-Никольса для ПИД-регулятора: $k_p = 0,6k_{кр}$; $T_i = 0,5T_{кр}$; $T_d = 0,125T_{кр}$. При таких параметрах получается неустойчивый процесс. Это может объясниться тем, что метод Зиглера-Никольса используется в основном для медленно протекающих процессов и не всегда даёт верный результат [9]. При уменьшении T_d в 10 раз – получаем устойчивый процесс (табл. 1, п. 6). Графики переходного процесса представлены на рис. 8.

Передаточная функция по заданию при неизменной нагрузке на двигатель имеет вид:

$$W(p) = \frac{\varphi}{\varphi_3} = \frac{k_p k_o (T_d T_i p^2 + T_i p + 1)}{(T_o T_p + k_o k_p T_d T_i) p^2 + (T_o + T_p + k_o k_p T_i) p + 1 + k_o k_p} \quad (5)$$

Параметры объекта и ПИД-регулятора при действительных корнях характеристического уравнения [10] представлены в таблице 2, п.1.

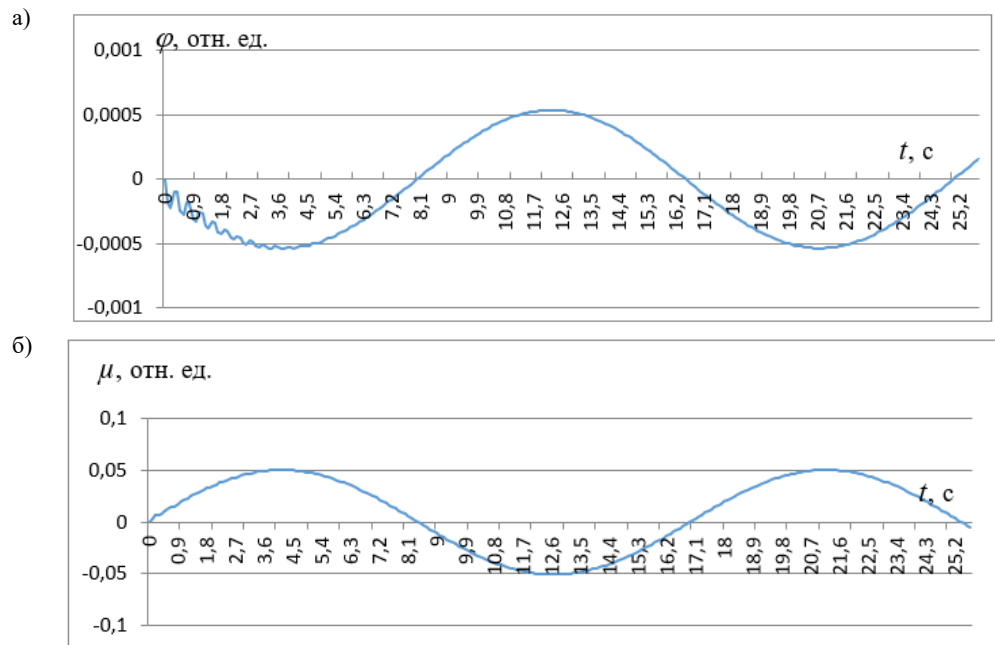


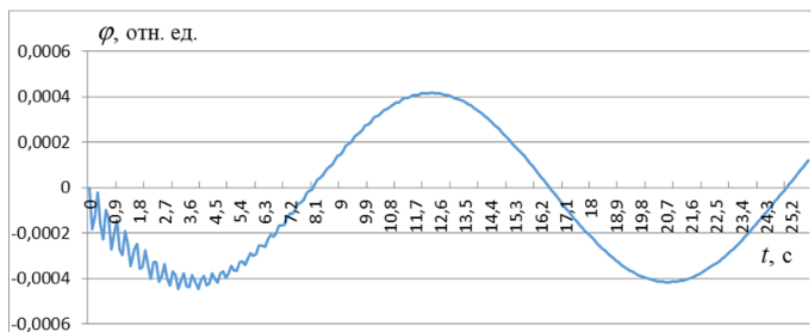
Рис. 8. Переходные процессы с оптимизированными параметрами П-регулятора, определёнными по методу Зиглера-Никольса
а – регулируемого параметра, б – регулирующего органа

Таблица 1

Параметры объекта и регулятора при изменении нагрузки

Параметры объекта регулирования			Параметры регулятора				Параметры колебаний синусоидальной нагрузки		Коэффициенты характеристического уравнения				Координаты диаграммы Вышнеградского	
T_o, c	k_o	k_λ	T_p, c	k_p	T_d, c	T_i, c	λ_m	T, c	a_0	a_1	a_2	a_3	A	B
1. Аперiodические процессы														
1	1	1	0,5	1	0,3	1,5	0,05	17	0,75	2,7	3	1	3,27	3,30
2. Колебательные процессы														
1	1	1	0,5	1	0,2	0,3	0,05	17	0,15	0,51	0,6	1	1,80	1,13
3. Аперiodические процессы с небольшими колебаниями														
1	1	1	0,5	113,4	0,0005	1	0,05	17	0,5	1,56	114,4	113,4	0,51	6,15
4. с параметрами регулятора на границе устойчивости														
1	1	1	0,5	189	0	∞	0,05	17	5×10^7	$1,5 \times 10^8$	$1,9 \times 10^{10}$	189	194,9	$1,6 \times 10^6$
5. Процессы с оптимизированными параметрами П-регулятора, определённые по методу Зиглера-Никольса														
1	1	1	0,5	95,5	0	∞	0,05	17	5×10^7	$1,5 \times 10^8$	$1,9 \times 10^{10}$	189	194,9	$1,6 \times 10^6$
6. Процессы с оптимизированными параметрами ПИД-регулятора, определённые по методу Зиглера-Никольса с корректировкой T_d														
1	1	1	0,5	113,4	0,025	1,2	0,05	17	0,6	2,14	137,28	113,4	0,621	6,947

а)



б)

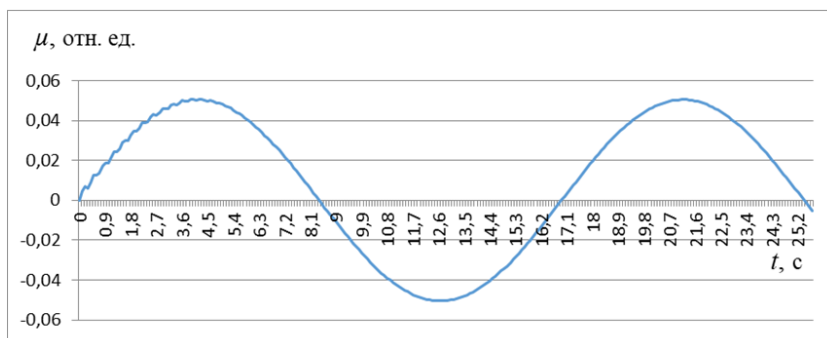


Рис. 9. Переходные процессы с оптимизированными параметрами ПИД-регулятора, определённые по методу Зиглера-Никольса с корректировкой T_d
 а – регулируемого параметра, б – регулирующего органа

Графики переходных процессов регулируемого параметра и регулирующего органа при изменении задания для ПИД-регулятора при действительных корнях характеристического уравнения приведены на рис. 10.

Таблица 2

Параметры объекта и регулятора при изменении задания

Постоянная времени и коэффициенты объекта регулирования			Постоянная времени и коэффициенты регулятора				Скачок заданного значения	Коэффициенты характеристического уравнения			Корни характеристического уравнения	
T_o, c	k_o	k_λ	T_p, c	k_p	T_d, c	T_i, c	φ_z	a_0	a_1	a_2	p_1	p_2
1. Переходные процессы при действительных корнях характеристического уравнения												
1	1	1	0,5	1	0,0005	1	0,1	0,50	2,5	2	-1,00	-3,99
2. Переходные процессы при комплексных корнях характеристического уравнения												
1	1	1	0,5	1	0,5	1	0,1	1	2,5	2	-1,25+ i1,32	-1,25- i1,32

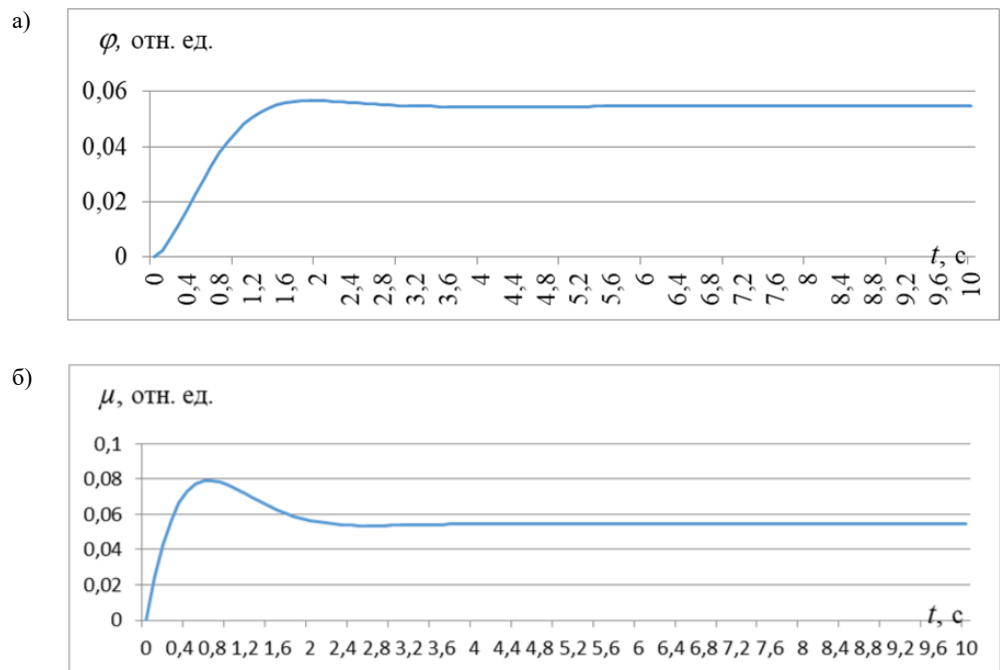


Рис. 10. Переходные процессы при изменении задания для ПИД-регулятора при действительных корнях характеристического уравнения а – регулируемого параметра, б – регулирующего органа

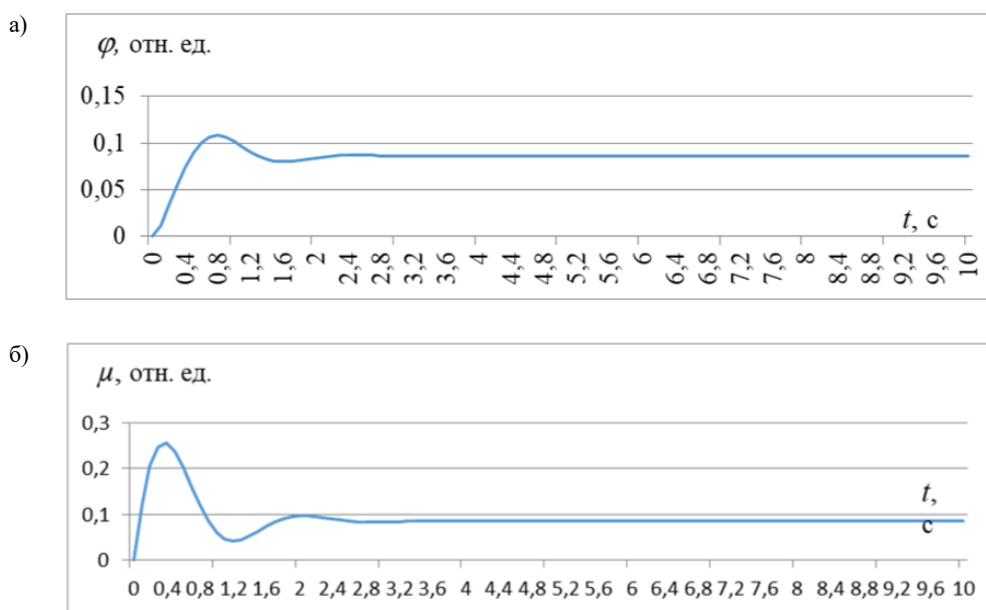


Рис. 11. Переходные процессы при изменении задания для ПИД-регулятора при комплексных корнях характеристического уравнения
 а – регулируемого параметра, б – регулирующего органа

Выводы

Практическая значимость результатов:

1. При работе судна в условиях волнения с целью уменьшения забросов частоты вращения необходимо увеличивать коэффициент усиления регулятора и уменьшать время дифференцирования.

2. При изменении задания частоты вращения коэффициент усиления регулятора должен быть низким, а время дифференцирования немного увеличенным.

Наименьшая амплитуда колебаний регулируемого параметра (частоты вращения главного дизеля) при синусоидальных колебаниях нагрузки выходит при параметрах ПИД-регулятора, когда координаты диаграммы Вышнеградского попадают в зону аperiodических процессов с небольшими колебаниями (рис. 8).

При изменении задания для ПИД-регулятора, наименьшее время переходного процесса получается при комплексных корнях характеристического уравнения.

Кроме этого, при действительных корнях характеристического уравнения увеличивается расхождение между заданной и действительной величиной регулируемого параметра (рис. 9).

Список литературы

1. Панов Б.Н. Гидрометеорологическое обеспечение судовождения, Керчь, изд. КГМТУ, 2020, 172 с.
2. Возницкий И.В. Техническая эксплуатация двигателей промышленных судов. М., изд. Пищевая промышленность, 1969, 368 с.
3. Кацман Ф. М. Эксплуатация пропульсивного комплекса морского судна. М.: Транспорт, 1987. 224 с.
4. Инструкция по эксплуатации двигателей 50-98 МС. Копенгаген: MANB&W. 1997. С. 40.

5. Кузьменко Г. В., Панасенко А. А. Дозировка цилиндрического масла в главных судовых крейцкопфных малооборотных двигателях: учеб. пособие. Владивосток: Мор. гос. ун-т им. адм. Г. И. Невельского, 2010. 35 с.
6. Правила технической эксплуатации судовых технических средств и конструкций. СПб.: ЗАО ЦНИИМФ, 1997. 446 с.
7. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – изд. 4-е, перераб. и доп. – СПб.: Изд-во «Профессия», 2003.
8. Востриков А.С., Французова Г.А. Теория автоматического регулирования. – М.: Высш. шк., 2004. 365 с.
9. Настройка ПИД–регулятора по методу Циглера–Николса URL: <https://elektr.pprrel.ru/nastroyka-pid-regulyatora-po-metodu-tsiglera-nikolsa> (дата обращения: 20.11.2025).
10. Сырчина А.С., Кулешов А.В. Синтез регулятора индикаторного гиростабилизатора с использованием критерия Вышнеградского. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 11. С. 99-110.
11. Онлайн калькулятор кубических уравнений. https://calc-x.ru/online_cubic_equation_calculator.php (дата обращения: 20.11.2025).

References

1. Panov B.N. Gidrometeorologicheskoe obespechenie sudovozhdeniya [Hydrometeorological support of navigation], Kerch', izd. KGMTU, 2020, 172 p.
2. Vozniczkij I.V. Texnicheskaya e'kspluatatsiya dvigatelej promy'slovy'x sudov [Technical exploitation of fishing vessel engines]. M., izd. Pishhevaya promy'shennost', 1969, 368 p. (In Russ).
3. Kaczman F. M. E'kspluatatsiya propul'sivnogo kompleksa morskogo sudna [Exploitation of the propulsion system of a marine vessel]. M.: Transport, 1987. 224 p. (In Russ).
4. Instruktsiya po e'kspluatatsii dvigatelej 50-98 MS [Exploitation instructions for engines 50-98 MS]. Kopenhagen: MANB&W. 1997. 40 p.
5. Kuzmenko G. V., Panasenko A. A. Dozirovka cilindrovogo masla v glavny'x sudovy'x krejczkopfny'x malooborotny'x dvigatelyax [Dosage of cylinder oil in main marine low-speed crosshead engines]: ucheb.posobie. Vladivostok: Mor.gos. un-t im. adm. G. I. Nevel'skogo, 2010. 35 p. (In Russ).
6. Pravila texnicheskoj e'kspluatatsii sudovy'x texnicheskix sredstv i konstrukcij [Rules of technical exploitation of ship's equipment and structures]. SPb.: ZAO CNIIMF, 1997. 446 p. (In Russ).
7. Besekerskiy V.A., Popov E.P. Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya [Theory of automatic control systems]. – izd. 4-e, pererab. i dop. – SPb.: Izd-vo «Professiya», 2003. (In Russ).
8. Vostrikov A.S., Francuzova G.A. Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya [Theory of automatic regulation]. – M.: Vy'ssh. shk., 2004. 365 p. (In Russ).
9. Nastrojka PID–regulyatora po metodu Ciglera–Nikolsa [Adjusting the PID controller using the Ziegler–Nichols method] URL: <https://elektr.pprrel.ru/nastroyka-pid-regulyatora-po-metodu-tsiglera-nikolsa>. (In Russ).
10. Sy'rchina A.S., Kuleshov A.V. Sintez regulyatora indikatornogo girostabilizatora s ispol'zovaniem kriteriya Vy'shnegradskogo [Synthesis of the indicator gyrostabilizer regulator using the Vyshnegradsky criterion]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Texnicheskie nauki. 2022. № 11. p.p. 99-110.
11. Online Cubic Equation Calculator https://calc-x.ru/online_cubic_equation_calculator.php (In Russ).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Панасенко Андрей Александрович, к.т.н.,
доцент, доцент кафедры эксплуатации
автоматизированных судовых энергетических
установок, МГУ им. адм. Г.И. Невельского,
ул. Верхнепортовая, д. 50а, г. Владивосток,
Россия, 690003, e-mail: AAPanasenko@msun.ru

Andrey A. Panasenko, PhD in Engineering
Science, Associate Professor of Ship's Power
Plants Automation Department, Maritime State
University named after admiral G.I. Nevelskoi,
690003, 50a, Verkhneportovaya St., Vladivostok,
Russia, e-mail: AAPanasenko@msun.ru

Петрашёв Сергей Владимирович, к.т.н.,
доцент, доцент кафедры теории и устройства
судна, МГУ им. адм. Г.И. Невельского. ул.
Верхнепортовая, д. 50а, г. Владивосток, Россия,
690003, e-mail: petrashov@msun.ru

Sergey V. Petrashev, PhD in Engineering
Science, Associate Professor of the Theory and
Vessel Construction Department, Maritime State
University named after admiral G.I. Nevelskoi.
690003, 50a, Verkhneportovaya St., Vladivostok,
Russia, e-mail: petrashov@msun.ru

Статья поступила в редакцию 18.12.2025; принята к публикации 05.02.2026;
опубликована онлайн 20.03.2026. Received 18.12.2025; published online 20.03.2026.

УДК 621.6.03
DOI: 10.37890/jwt.vi86.687

Определение предельного содержания нефтепродуктов при термическом обезвреживании нефтесодержащих вод в газоходе, моделирующем газоразводную трубопроводную систему судового дизеля

В.А. Чернов
О.П. Шураев
А.Г. Чичурин

Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Определение предельно допустимой концентрации нефтепродуктов в нефтесодержащих водах, подаваемых в газоразводную систему судового дизеля, является обязательным этапом определения границ эффективной и экологически допустимой работы стенда (установки) термического обезвреживания.

При распылении нефтесодержащих вод в поток высокотемпературных продуктов сгорания одновременно протекают процессы нагрева капель, испарения, термического разложения и окисления, что приводит к изменению температурного режима и состава уходящих газов.

В работе приведены результаты экспериментального исследования влияния концентрации нефтепродуктов в нефтесодержащих водах на температурное поле газохода и концентрации нормируемых компонентов продуктов сгорания. Эксперименты выполнены на лабораторном стенде, моделирующем параметры газоразводной системы судового дизеля, при постоянной температуре продуктов сгорания 520 °С и давлении подачи НСВ 1,8 бар. Концентрация нефтепродуктов варьировалась в диапазоне 0,1–11,5 %.

Совместный анализ температурного поля и состава уходящих газов (СО, NO, NO₂, СН) позволил выявить диапазон концентраций, в пределах которого процесс термического обезвреживания протекает устойчиво и без ухудшения экологических характеристик источника выбросов. При превышении данного диапазона наблюдается качественная перестройка теплового и химического режимов, сопровождающаяся изменением эмиссионных показателей.

Полученные результаты формируют экспериментально обоснованные границы функционирования способа и создают основу для перехода к проведению интерполяционного (экстремального) эксперимента.

Ключевые слова: судовые нефтесодержащие воды; термическое обезвреживание; газоход судового двигателя; интерполяционный (экстремальный) эксперимент.

Determination of the limiting petroleum product content during the thermal treatment of oil-containing wastewater in a gas duct simulating the exhaust pipeline of a marine diesel engine

Vladimir A. Chernov
Oleg P. Shurayev
Alexander G. Chichurin

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Determining the maximum permissible concentration of petroleum products in oily wastewater supplied to the exhaust tract of a marine diesel engine is a mandatory step in defining the boundaries of efficient and environmentally acceptable operation of a thermal treatment test bench (installation).

When oily wastewater is atomized into a flow of high-temperature combustion products, simultaneous processes of droplet heating, evaporation, thermal decomposition, and oxidation occur, leading to changes in the temperature regime and the composition of the exhaust gases.

The results of an experimental study of the influence of petroleum product concentration in oily wastewater on the temperature field of the gas duct and on the concentrations of regulated components of combustion products are presented in the article. The experiments were carried out using a laboratory test bench simulating the parameters of a marine diesel engine exhaust system at a constant combustion gas temperature of 520 °C and an oily wastewater supply pressure of 1.8 bar. The concentration of petroleum products was varied within the range of 0.1–11.5%.

A combined analysis of the temperature field and exhaust gas composition (CO, NO, NO₂, CH) made it possible to identify a concentration range within which the thermal treatment process proceeds steadily without deterioration of the environmental performance of the emission source. When this range is exceeded, a qualitative restructuring of the thermal and chemical regimes is observed, accompanied by changes in emission characteristics.

The obtained results establish experimentally substantiated operational boundaries for the proposed method and provide a basis for proceeding to an interpolation (extremal) experimental study.

Keywords: marine oil-containing waters; thermal treatment; marine engine exhaust duct; interpolation (extreme-value) experiment.

Введение

Анализ проблем, возникающих при очистке судовых нефтесодержащих вод (НСВ), показывает всю сложность ее решения и недостатки существующих для этой цели судовых технических средств [1, 2]. Одним из перспективных направлений обезвреживания НСВ является термический способ, суть которого состоит в утилизации НСВ в отработавших газах судовых двигателей.

Процесс термического обезвреживания нефтесодержащих вод протекает в условиях совместного тепло- и массообмена между газовым потоком, водной фазой и органической составляющей загрязнений. При подаче нефтесодержащих вод в высокотемпературную газовую среду реализуется последовательность стадий, включающая нагрев капель, испарение воды, термическое разложение углеводородов и окисление образующихся продуктов [3, 4, 5, 6]. Соотношение между этими стадиями определяется не только температурным уровнем газового потока, но и составом подаваемой НСВ.

С увеличением содержания нефтепродуктов в НСВ изменяются условия протекания процесса, что отражается на тепловом режиме газового потока и характере распределения температуры по длине газохода. При определённых концентрациях нефтепродуктов данные изменения могут приводить к нарушению устойчивости процесса термического обезвреживания, сопровождающемуся неполным дожиганием углеводородов и ростом концентраций токсичных компонентов в отработавших газах.

В этой связи концентрация нефтепродуктов в НСВ может рассматриваться как параметр, ограничивающий допустимый режим работы системы термического обезвреживания. Превышение некоторого предельного значения данного параметра приводит к ухудшению экологических характеристик процесса, тогда как его занижение неадекватно с точки зрения утилизационного потенциала способа.

К настоящему времени проведен отсеивающий эксперимент [7], показавший, что температурное поле в газоходе при подаче НСВ определяется только входной температурой потока, а газовый состав зависит от температуры, концентрации НСВ (за исключением оксида азота NO₂) и давления впрыска (за исключением оксида азота NO₂ и углеводородов CH). Перед проведением интерполяционного эксперимента

целесообразно установить границы эффективной работы стенда термического обезвреживания, касающиеся предельной концентрации НСВ.

Для определения максимально допустимой концентрации нефтепродуктов в НСВ был подготовлен эксперимент, направленный на изучение влияния данного фактора на температурные характеристики газового потока и состав продуктов сгорания.

Таким образом, целью текущего этапа исследования является определение влияния концентрации нефтепродуктов в НСВ на температурное поле в газоходе и содержание нормируемых вредных веществ в уходящих газах, что позволяет установить предельное содержание нефтепродуктов, обеспечивающее протекание процессов испарения, термического разложения и окисления в газораспределительном тракте, не ухудшающее экологические показатели источника выбросов: в рассматриваемом варианте – горелки стенда, в перспективе – судового дизеля.

Методы исследования

Исследование процесса термического обезвреживания НСВ и определение допустимого содержания нефтепродуктов в их составе проводились в лабораторных условиях на стенде рис. 1, воспроизводящем температурные и газодинамические параметры газохода судового дизельного двигателя [8]. Конструкция стенда обеспечивала формирование устойчивого высокотемпературного газового потока и подачу в мелкораспыленном виде нефтесодержащих вод с заданными физико-химическими характеристиками.

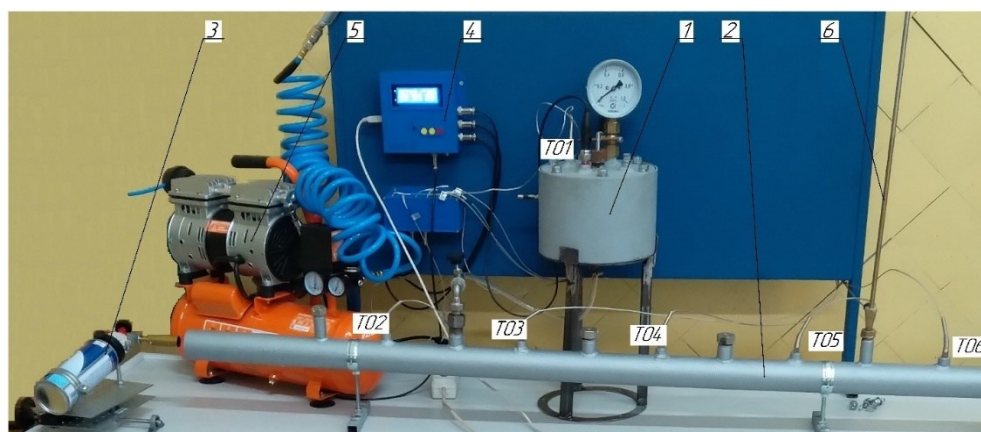


Рис. 1. Стенд для термического обезвреживания нефтесодержащих вод
1 – напорный бак, 2 – газоход, 3 – источник горячих газов, 4 – блок регистрации измерений, 5 – компрессор, 6 – зонд газоанализатора

Источником высокотемпературных продуктов сгорания служит газовая горелка, позволяющая формировать газовый состав и температурный режим, характерный для газораспределительных систем судовых дизелей. Температура газового потока регулировалась режимом работы горелки и контролировалась в характерных сечениях газохода с помощью термопар (T02...T06 на рис. 1).

Подача нефтесодержащих вод в газовый тракт осуществлялась через трубопровод под давлением, поддерживаемым на заданном уровне в течение каждого опыта. Концентрация нефтепродуктов задавалась приготовлением модельных смесей с требуемым объемным содержанием нефтепродуктов.

Состав продуктов сгорания определялся с использованием газоанализатора АГМ-510МВ, выполняющим измерение концентрации оксида углерода CO, оксидов азота (раздельно NO и NO₂) и углеводородов (CH) после выхода газового потока из зоны термического обезвреживания на всех режимах работы стенда.

В рамках данной серии опытов температура продуктов сгорания (520 °С) и давление подачи НСВ (1,8 бар) поддерживались постоянными и соответствующими значениям в центре плана отсеивающего эксперимента, тогда как концентрация нефтепродуктов изменялась в диапазоне от 0,1 до 11,5 %. Опыт при концентрации 3,5 % проводился дважды с целью проверки воспроизводимости результатов. План эксперимента приведён в таблице.

Таблица

План эксперимента для определения допустимой концентрации нефтепродуктов в НСВ

Фактор Опыт	Температура продуктов сгорания газового топлива,		Концентрация нефтепродукта в НСВ		Давление в трубопроводе подачи нефтедержащих вод,	
	Код	Т _{вых} , °С	Код	НСВ, %	Код	рвпр, бар
1	0	520	-1,4	0,1	0	1,8
2			0	1,5		
3			+2	3,5		
4			+10	11,5		

Каждый опыт реализовывался по трёхэтапной схеме. На первом этапе осуществлялся прогрев газохода до заданной температуры. На втором этапе в поток продуктов сгорания подавалась НСВ с заданной концентрацией нефтепродуктов. На третьем этапе, после завершения подачи жидкости, установка функционировала в режиме сухого газохода, что сопровождалось повышением температуры газовой среды.

Одной из задач при проведении опытов являлась оценка соответствия фактических условий их плановым значениям. Температура газового потока относится к числу существенно влияющих факторов, определяющих характер протекания процессов в газоходе. При этом определяющим является не только значение входной температуры, регистрируемой термопарой Т02, но и распределение температуры по всей длине канала.

Для контроля температурного режима ранее была разработана математическая модель изменения температуры по длине газохода на этапе прогрева [9]. Модель позволяет по заданной входной температуре рассчитывать плановые значения температуры во всех контрольных сечениях. На рис. 2 представлено распределение температуры по длине газохода на этапе прогрева, полученное экспериментально и сопоставленное с расчётной зависимостью, полученной в работе [9]

$$\frac{t - t_{окр}}{t_{Т02} - t_{окр}} = \exp(-\lambda \cdot x), \tag{1}$$

где t – искомая температура; $t_{Т02}$ – температура газового потока перед зоной обезвреживания, выставляемая по термопаре Т02; $t_{окр}$ – температура окружающей среды, λ - параметр, m^{-1} , характеризующий интенсивность теплопередачи, чем больше величина λ в формуле, тем сильнее снижается температура газа вдоль оси трубы; x – координата, м, откладываемая вдоль оси канала от точки установки термопары Т02.

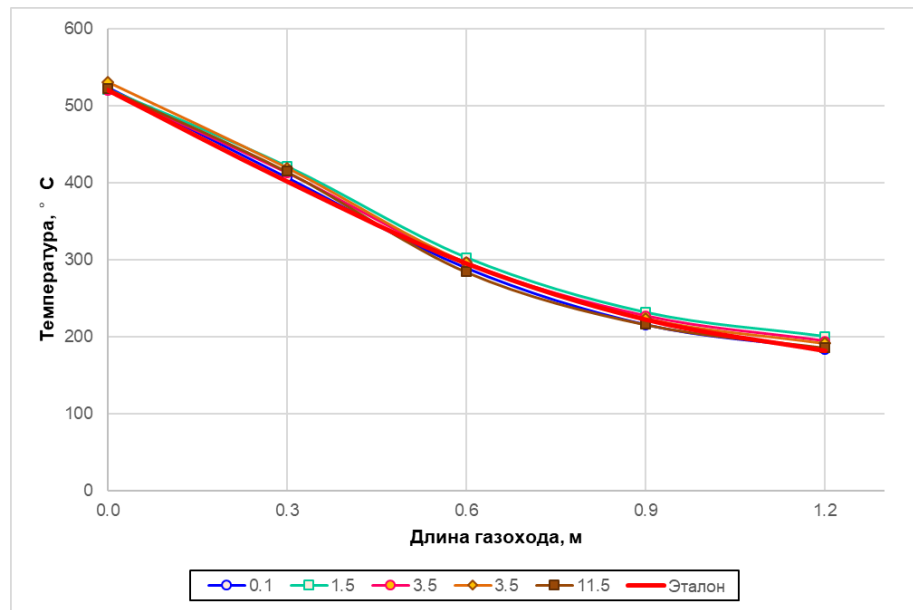


Рис. 2. Распределение температуры по длине газохода на этапе прогрева

Температура T02 рассматривается как определяющий параметр, формирующий эталонное температурное поле. Соответствие фактического распределения расчётному подтверждается величиной отклонений (рис. 3), которые в каждой точке не превышают величины $\pm 5\%$ от эталонного значения при среднем значении $\pm 1.8\%$ (несколько большие отклонения в конечной точке измерения температуры (термопара T06) существенного влияния на процесс термического обезвреживания не оказывают). Волновой характер отклонений температуры может быть объяснен несовпадением оси факела горелки с осью газохода.

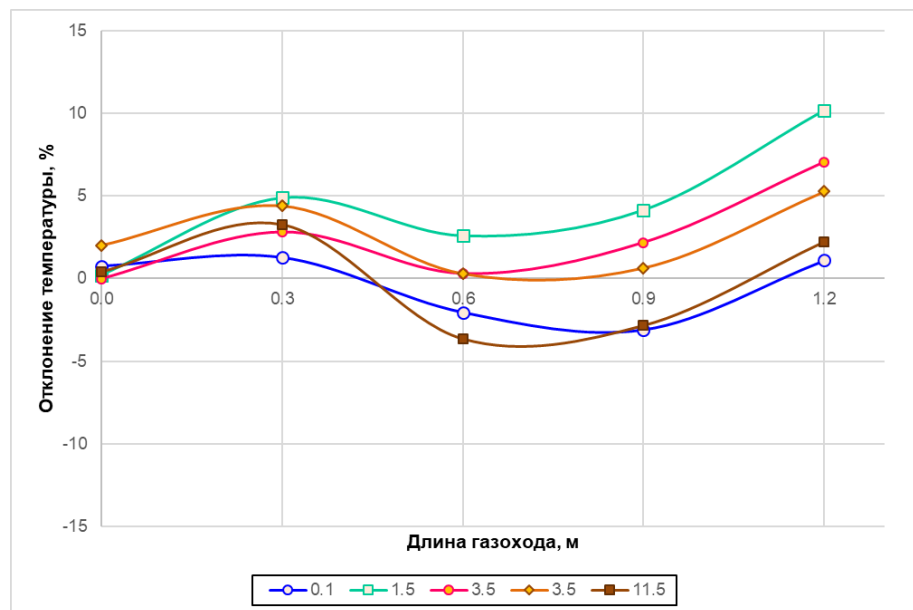


Рис. 3. Отклонение температуры на этапе прогрева от расчетной

Источником высокотемпературных продуктов сгорания являлась газовая горелка, поэтому температурный режим в значительной мере определялся расходом газового топлива и количеством воздуха, участвующего в горении. Массовый расход газа определялся по показаниям весового датчика. Для каждого опыта устанавливался новый газовый баллон, что обеспечивало одинаковый расход газа (рис. 4). В сочетании с поддержанием неизменного коэффициента избытка воздуха в различных опытах это обеспечивало стабильность тепловой мощности источника и воспроизводимость входной температуры.

Точность задания концентрации нефтепродукта в НСВ оценивалась на основе расчёта относительной погрешности

$$\delta C_{НСВ} = \frac{\Delta C_{НСВ}}{C_{НСВ}}. \tag{2}$$

Расчёт выполнялся для каждого опыта. Установлено, что суммарная относительная погрешность задания концентрации не превышает 2%, что обеспечивает корректность анализа влияния концентрационного фактора на температурное поле и состав уходящих газов.

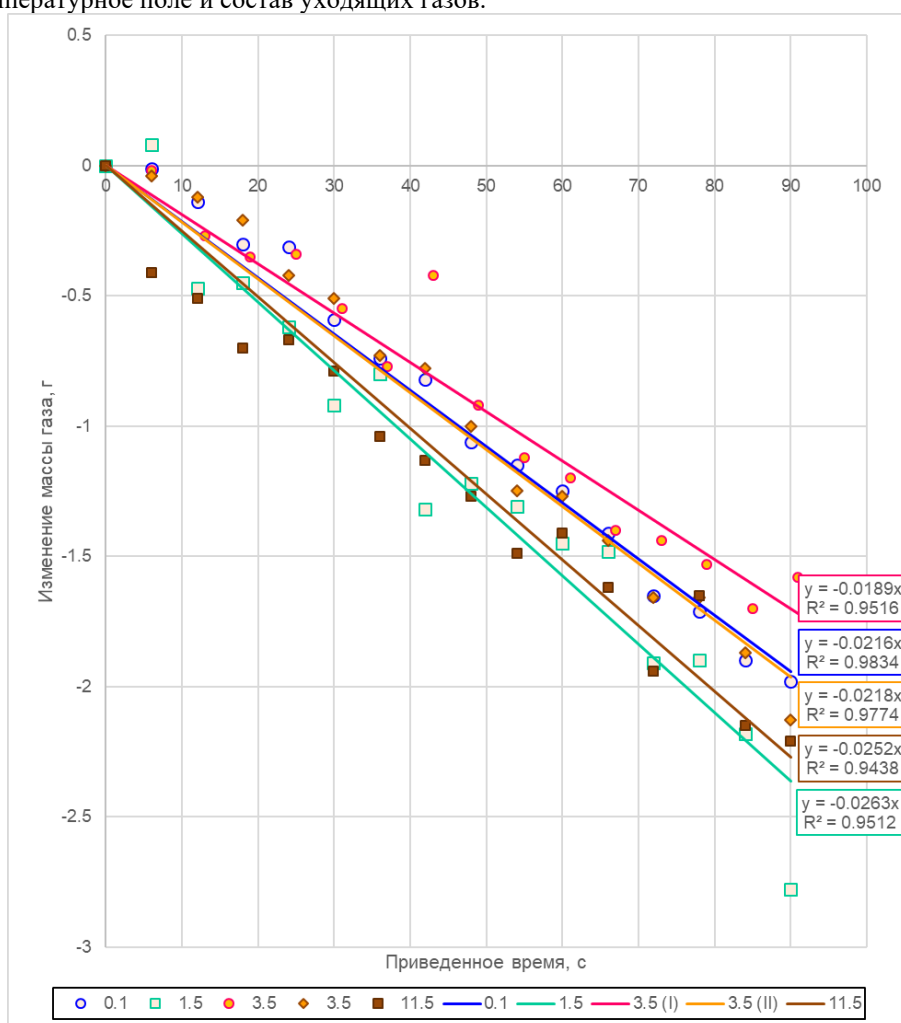


Рис. 4. Расход газа для работы стенда

Соответствие давления в баке установленному по плану эксперимента обеспечивалось выбором на этапе подачи НСВ участка записи показаний термопар и

данных газового анализа, на котором оно изменялось на величину не более $\pm 1,2$ %. Таким образом обеспечивалось постоянство расхода подаваемой НСВ.

Экспериментальные исследования проводились при стабильных параметрах окружающей среды: температуре воздуха 25...28 °С, атмосферном давлении 993...997 гПа и относительной влажности 39...54 %.

Результаты и их обработка

Проведённая серия опытов позволила получить данные о влиянии концентрации нефтепродуктов в НСВ на температурное поле газохода и состав уходящих газов (рис. 5-7).

Анализ распределения температуры по длине газохода при подаче НСВ (рис. 5, 6) показал, что в диапазоне концентраций нефтепродуктов 0,1–3,5 % различия между температурными кривыми носят незначительный характер. Это свидетельствует о сохранении практически неизменного теплового режима и устойчивости процесса при низких и средних концентрациях. Повторный опыт при концентрации 3,5 % подтвердил воспроизводимость результатов.

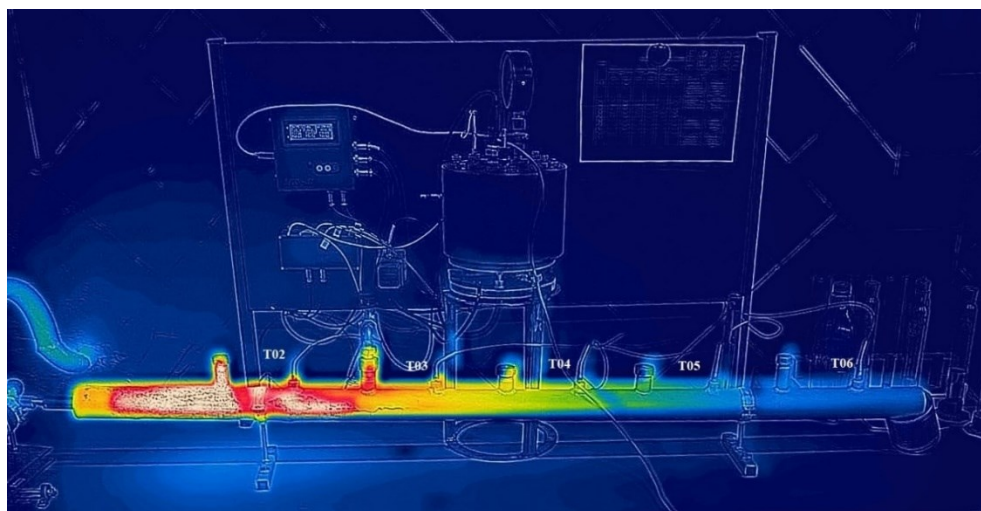


Рис. 5. Распределение температуры по длине газохода на этапе подачи НСВ при тепловизионной съемке

В то же время при концентрации 11,5 % по всей длине газохода фиксируются повышенные значения температуры, наиболее выраженные в зоне расположения термопар Т03–Т06. При этом качественный характер температурного распределения сохраняется, однако глубина локального температурного снижения уменьшается по сравнению с режимами подачи малоконцентрированной НСВ. Наблюдаемые изменения могут быть обусловлены дополнительным тепловыделением при окислении углеводородной составляющей НСВ.

В области малых концентраций преобладает охлаждающий эффект испарения. По мере увеличения доли нефтепродуктов возрастает вклад тепловыделения, что приводит к стабилизации, а затем к росту температуры в газохода (рис. 7). Выявленная закономерность позволяет определить диапазон концентраций, при котором сохраняется требуемый температурный уровень для устойчивого протекания реакций.

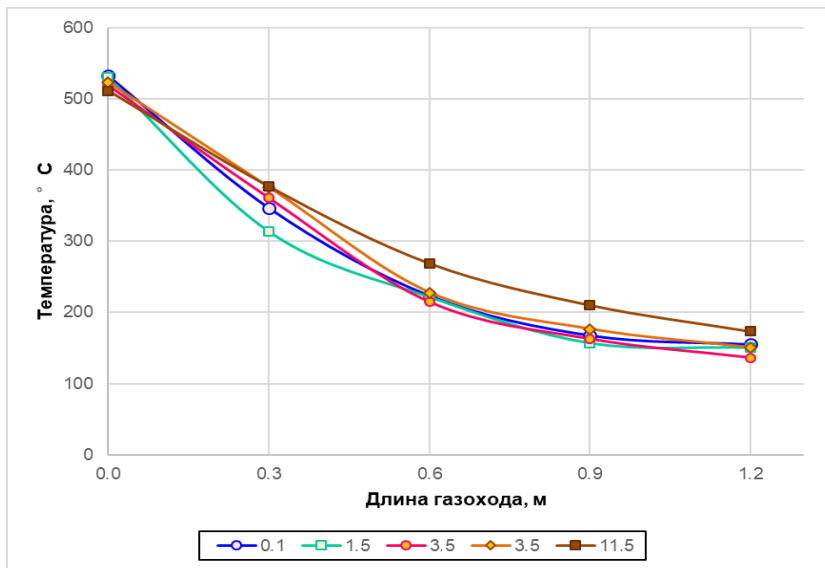


Рис. 6. Распределение температуры по длине газохода на этапе подачи НСВ

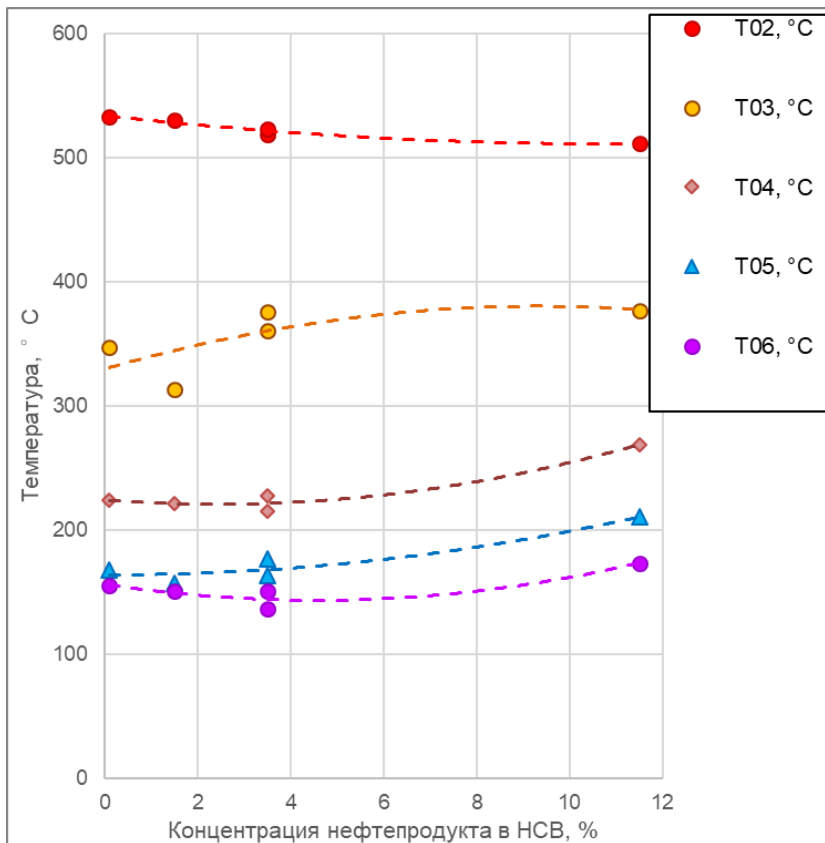


Рис. 7. Зависимость температуры, зарегистрированной термопарами T02...T06, от концентрации нефтепродукта в НСВ

Поскольку изменение температурного режима неизбежно отражается на составе продуктов сгорания, при проведении опытов особое внимание уделялось контролю

нормируемых вредных веществ [10]. Оценка эмиссии отработавших газов судовых дизелей является важной частью расчета коэффициентов энергоэффективности и углеродоемкости, введенных Международной морской организацией (ИМО) [11, 12, 13].

Результаты анализа газов представлены на рис. 8. Содержание в выпускных газах углеводородов СН при увеличении концентрации нефтепродуктов в НСВ монотонно увеличивается, содержание монооксида углерода СО имеет достаточно выраженный минимум в окрестности 4% $C_{НСВ}$, а содержание оксидов азота имеет разнонаправленные тенденции: снижение содержания NO и рост содержания NO₂.

Совместный анализ температурных распределений и данных газоанализа позволил определить диапазон концентраций, при котором обеспечивается протекание процессов без существенного ухудшения экологических показателей.

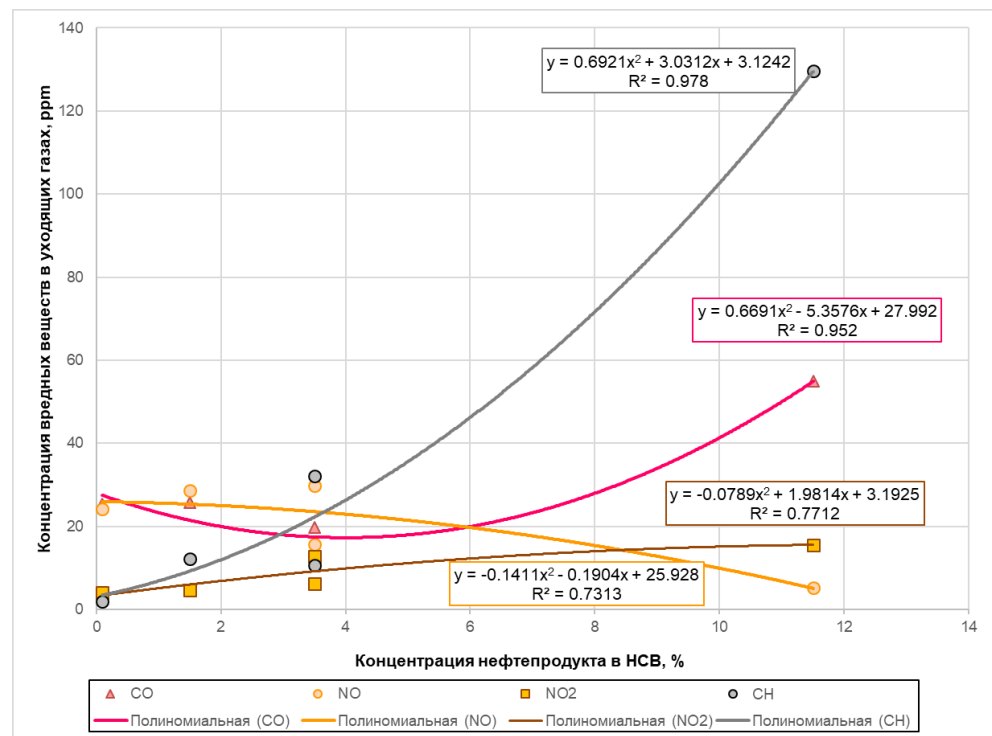


Рис. 8. Концентрация вредных веществ в уходящих газах в зависимости от концентрации нефтепродукта в НСВ

Из полученных зависимостей следует, что при концентрациях нефтепродуктов до 3,5% содержание нормируемых вредных веществ не превышает 40 ppm, что примерно соответствует эмиссии этих веществ от самой горелки [7, 8, 10] и сопоставимо с величиной погрешности при испытаниях на соответствие нормативам выбросов вредных (загрязняющих) веществ в выпускных газах [14, 15, 16]. При увеличении концентрации до 11,5 % наблюдается существенное изменение состава продуктов сгорания с увеличением СО и СН, что недопустимо при работе предлагаемого устройства термического обезвреживания в составе дизельной установки.

Таким образом, для рассматриваемых условий ($T_{\text{вых}} = 520 \text{ }^\circ\text{C}$, $p_{\text{впр}} = 1,8 \text{ бар}$) допустимым следует считать содержание нефтепродуктов в НСВ на уровне до 3,5 %, поскольку в данном диапазоне обеспечивается устойчивое протекание процессов испарения, термического разложения и окисления без ухудшения экологических показателей работы установки.

Учитывая, что стандартное содержание нефтепродуктов в НСВ для СЭУ, как правило, не превышает 1-2% [17, 18], то можно предполагать применимость данного метода для утилизации судовых НСВ практически с их минимальной предварительной подготовкой.

Выводы

1. Условия эксперимента корректно выдержаны при его проведении. Температура во всех точках газохода перед подачей НСВ отличается от теоретической, определенной по модели распределения температуры по длине газохода, в среднем на величину 1.8%. Основной причиной отклонения, по нашему мнению, является несовпадение оси факела горелки и оси газохода. Погрешность задания концентрации НСВ не превышает 2%, а давления, при котором осуществляется подача НСВ, меньше 1.2%. Таким образом, суммарная погрешность задания факторов не превышает 5%. Применение для каждого опыта нового газового баллона положительно сказалось на поддержании приблизительно одинакового расхода газа и коэффициента избытка воздуха.

2. При подаче НСВ, как и в ранее проведенных экспериментах, наблюдается снижение температуры во всех контрольных точках. Ранее было установлено, что процесс обезвреживания осуществляется преимущественно на интервале между термопарами Т02 и Т03. Это подтверждается и тепловизионной съемкой. При низкой концентрации нефтепродуктов в НСВ снижение температуры максимально, так как в газоход подается большое количество воды, имеющей высокую удельную теплоту парообразования, и тем самым отбирается большее количество теплоты. С увеличением нефтесодержания в подаваемой НСВ, происходит их окисление, сопровождающееся выделением теплоты, что вызывает некоторое повышение температуры. При умеренном увеличении концентрации (до 3,5%) рост температуры наблюдается прежде всего в окрестности термопары Т03, а дальнейшее увеличение концентрации приводит к повышению температуры во всех точках газохода.

3. Для рассматриваемых тепловых условий ($T_{\text{вых}} = 520 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $p_{\text{впр}} = 1,8 \text{ бар}$) допустимым следует считать содержание нефтепродуктов в НСВ на уровне до 3,5 %, поскольку в данном диапазоне обеспечивается устойчивое протекание процессов испарения, термического разложения и окисления без ухудшения экологических показателей работы установки.

Список литературы

1. Истомин В.И. Комплексная очистка судовых нефтесодержащих вод. Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2004, 202 с.
2. Ермошин Н.Г., Калугин В.Н., Корнилов Э.В., Кулешов И.Н. Судовые установки очистки нефтесодержащих вод. Методы и схемы очистки, устройство и эксплуатация. Одесса: Фенікс, 2004, 44 с.
3. Методы утилизации нефтяных шламов / И. Ш. Хуснутдинов, А. Г. Сафиулина, Р. Р. Заббаров, С. И. Хуснутдинов // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2015. – Т. 58. – № 10. – С. 3-20. - EDN UQCSGR.
4. Чернов В.А., Бевза Д.И., Шураев О.П., Чичурин А.А. Методы очистки нефтесодержащих вод // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2022, № 3. С. 50-59. – DOI 10.24143/2073-1574-2022-3-50-59. – EDN FYYMJR.
5. Бернадинер М.Н., Шурыгин А.П. Огневая переработка и обезвреживание промышленных отходов. М.: Химия, 1990. 304 с.
6. Medeiros, A.D.M.d.; Silva Junior, C.J.G.d.; Amorim, J.D.P.d.; Durval, I.J.B.; Costa, A.F.d.S.; Sarubbo, L.A. Oily Wastewater Treatment: Methods, Challenges, and Trends. Processes 2022, 10, 743.
7. Чернов В.А., Шураев О.П., Чичурин А.А. Отсеивающий эксперимент по термическому обезвреживанию судовых нефтесодержащих вод // Морские интеллектуальные

- технологии. – 2025. – № 3-1(69). – С. 78-89. – DOI 10.37220/MIT.2025.69.3.023. – EDN FWRDBG.
8. Чернов В.А., Шураев О.П., Чичурин А.Г. Стенд для исследования термического обезвреживания нефтесодержащих вод. // Научные проблемы водного транспорта. 2022, №73. С. 79-87. - DOI 10.37890/jwt.vi73.314. – EDN SPAOSZ.
 9. Шураев О.П., Чернов В.А., Чичурин А. Г. Модель теплообмена в стенде термического обезвреживания нефтесодержащих вод. // Научные проблемы водного транспорта, 2025, №83. С. 95-105. – DOI 10.37890/jwt.vi83.594. – EDN GQAFSA.
 10. Чернов В.А., Шураев О.П., Чичурин А.Г., Гуро-Фролова Ю. Р. Доводочные испытания стенда термического обезвреживания судовых нефтесодержащих вод. Научные проблемы водного транспорта. 2024, №80. С. 77-88. - DOI 10.37890/jwt.vi80.513. – EDN LMDEDR.
 11. Трифионов А.В., Степанов Н.Е, Букин В.Г., Васильев А.В. Оценка эмиссии отработавших газов судовых энергетических установок. // Эксплуатация морского транспорта. 2024, № 4(113). – С. 143-151. DOI 10.34046/aumsuomt113/24. – EDN QLLKIP.
 12. Живлюк Г. Е., Петров А.П. Техническое обеспечение для соответствия судовых энергетических установок новым требованиям 2021 Г. По выбросам оксидов азота. // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2020. – Т. 12, № 1. – С. 122-138. – DOI 10.21821/2309-5180-2020-12-1-122-138. – EDN NFUGYI.
 13. Соловьев А.В. Методика оценки экологической эффективности судов внутреннего плавания. // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2017, №2(42). С. 306-322. - DOI 10.21821/2309-5180-2017-9-2-306-322. – EDN YLFWKR.
 14. ГОСТ 31967-2012. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Нормы и методы определения URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200104634> (Дата обращения 25.01.2026).
 15. Российское классификационное общество. Правила предотвращения загрязнения окружающей среды с судов. М.: 2019 (перезд. 2022). / URL: <https://rfclass.ru/assets/Uploads/PPZS.pdf?t=1718632553> (Дата обращения 02.02.2026).
 16. Технический кодекс по контролю за выбросами оксидов азота из судовых дизельных двигателей. URL: <https://www.iprosoft.ru/docs/?nd=499050234> (Дата обращения 25.01.2026).
 17. Тихомиров Г.И. Технология обработки воды на морских судах. Курс лекций. Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2013, 159 с.
 18. Нунупаров С.М. Предотвращение загрязнения моря судами. М.:«Транспорт», 1979, 336 с.

References

1. Istomin V.I. Kompleksnaya ochildka sudovykh neftesoderzhashchikh vod. Sevastopol': Izd-vo SeVNTU, 2004, 202 s.
2. Ermoshin N.G., Kalugin V.N., Kornilov E.H.V., Kuleshov I.N. Sudovye ustanovki ochildki neftesoderzhashchikh vod. Metody i skhemy ochildki, ustroystvo i ehkspluatatsiya. Odessa: Feniks, 2004, 44 s.
3. Metody utilizatsii neftyanykh shlamov / I. SH. Khusnutdinov, A. G. Safiulina, R. R. Zabbarov, S. I. Khusnutdinov // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya. – 2015. – Т. 58. – № 10. – С. 3-20. - EDN UQCSGR.
4. Chernov V.A., Bevza D.I., Shurayev O.P., Chichurin A.A. Metody ochildki neftesoderzhashchikh vod // Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2022, № 3. С. 50-59. – DOI 10.24143/2073-1574-2022-3-50-59. – EDN FYYMJR.
5. Bernadiner M.N., Shurygin A.P. Ognevaya pererabotka i obezvrezhivanie promyshlennykh otkhodov. M.: Khimiya, 1990. 304 s.
6. Medeiros, A.D.M.d.; Silva Junior, C.J.G.d.; Amorim, J.D.P.d.; Durval, I.J.B.; Costa, A.F.d.S.; Sarubbo, L.A. Oily Wastewater Treatment: Methods, Challenges, and Trends. Processes 2022, 10, 743.
7. Chernov V.A., Shurayev O.P., Chichurin A.A. Otseivayushchii ehksperiment po termicheskomu obezvrezhivaniyu sudovykh neftesoderzhashchikh vod // Morskije intellektual'nye tekhnologii. – 2025. – № 3-1(69). – С. 78-89. – DOI 10.37220/MIT.2025.69.3.023. – EDN FWRDBG.

8. Chernov V.A., Shurayev O.P., Chichurin A.G. Stend dlya issledovaniya termicheskogo obezvrezhivaniya neftesoderzhashchikh vod. // Nauchnye problemy vodnogo transporta. 2022, №73. S. 79-87. - DOI 10.37890/jwt.vi73.314. – EDN SPAOSZ.
9. Shurayev O.P., Chernov V.A., Chichurin A. G. Model' teploobmena v stende termicheskogo obezvrezhivaniya neftesoderzhashchikh vod. // Nauchnye problemy vodnogo transporta, 2025, №83. S. 95-105. – DOI 10.37890/jwt.vi83.594. – EDN GQAFSA.
10. Chernov V.A., Shurayev O.P., Chichurin A.G., Guro-Frolova YU. R. Dovodochnye ispytaniya stenda termicheskogo obezvrezhivaniya sudovykh neftesoderzhashchikh vod. Nauchnye problemy vodnogo transporta. 2024, №80. S. 77-88. DOI 10.37890/jwt.vi80.513. – EDN LMDEDR.
11. Trifonov A.V., Stepanov N.E, Bukin V.G., Vasil'ev A.V. Otsenka ehmissii otrabotavshikh gazov sudovykh ehnergeticheskikh ustanovok. // Ehkspluatatsiya morskogo transporta. 2024, № 4(113). – S. 143-151. DOI 10.34046/aumsuomt113/24. – EDN QLLKIP.
12. Zhivlyuk G. E., Petrov A.P. Tekhnicheskoe obespechenie dlya sootvetstviya sudovykh ehnergeticheskikh ustanovok novym trebovaniyam 2021 G. Po vybrosam oksidov azota. // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. – 2020. – T. 12, № 1. – S. 122-138. – DOI 10.21821/2309-5180-2020-12-1-122-138. – EDN NFUGYI.
13. Solov'ev A.V. Metodika otsenki ehkologicheskoi ehffektivnosti sudov vnutrennego plavaniya. // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. 2017, №2(42). С. 306-322. - DOI 10.21821/2309-5180-2017-9-2-306-322. – EDN YLFWKR.
14. GOST 31967-2012. Dvigateli vnutrennego sgoraniya porshnevye. Vybrosoy vrednykh veshchestv s otrabotavshimi gazami. Normy i metody opredeleniya URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200104634> (Data obrashcheniya 25.01.2026).
15. Rossiiskoe klassifikatsionnoe obshchestvo. Pravila predotvrashcheniya zagryazneniya okruzhayushchei sredy s sudov. M.: 2019 (pereizd. 2022). / URL: <https://rfclass.ru/assets/Uploads/PPZS.pdf?t=1718632553> (Data obrashcheniya 02.02.2026).
16. Tekhnicheskii kodeks po kontrolyu za vybrosami okislov azota iz sudovykh dizel'nykh dvigatelei. URL: <https://www.iprosoft.ru/docs/?nd=499050234> (Data obrashcheniya 25.01.2026).
17. Tikhomirov G.I. Tekhnologiya obrabotki vody na morskikh sudakh. Kurs lektsii. Vladivostok: Mor. gos. un-t, 2013, 159 s.
18. Nunuparov S.M. Predotvrashchenie zagryazneniya morya sudami. M.:«Transport», 1979, 336 s.

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, e-mail: solwrk@inbox.ru

Чернов Владимир Александрович, аспирант, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, ауд. 667, e-mail: vov7777@bk.ru

Vladimir A. Chernov, postgraduate, Volga state university of water transport, 5, Nesterova str., Nizhny Novgorod, 603950, Russia, e-mail: vov7777@bk.ru

Чичурин Александр Геннадьевич, 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: alex1.chich@yandex.ru

Alexander G. Chichurin, 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, e-mail: alex1.chich@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 12.02.2026; принята к публикации 26.02.2026; опубликована онлайн 20.03.2026. Received 12.02.2026; published online 20.03.2026.

**ЭКОНОМИКА, ЛОГИСТИКА И МЕНЕДЖМЕНТ НА
ТРАНСПОРТЕ**

ECONOMICS, LOGISTICS AND TRANSPORT MANAGEMENT

УДК 338.2

DOI: 10.37890/jwt.vi86.669

**Создание особых экономических условий для развития
речной терминальной инфраструктуры**

Д.В. Дрейбанд

ORCID: 0000-0003-0136-2495

Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В настоящее время всё большее внимание со стороны руководства нашей страны уделяется вопросам повышения эффективности использования уникального географического потенциала, развития речных перевозок и портовой инфраструктуры. Повышение привлекательности и привлечение инвестиций в данную сферу деятельности представляется возможным за счёт предоставления в прибрежных воднотранспортных узлах особых экономических условий хозяйствования путём создания на их территории бизнес-инкубаторов, технопарков, портовых особых экономических зон. Модернизацию речной инфраструктуры по всей стране целесообразно осуществлять централизованно на основе формирования комплексной опорной системы портов, соответствующей единой концепции и стандартам. Реализацию вышеуказанных мероприятий предлагается осуществить путем создания государственной корпорации, способной провести в страновом масштабе необходимую модернизацию портовой инфраструктуры и обеспечить благоприятные условия для работы различных организаций транспортно-логистического комплекса и других сфер деятельности.

Ключевые слова: речной транспорт, портовая инфраструктура, особые экономические зоны, бизнес-инкубаторы, технопарки, государственные корпорации.

**Creation of special economic conditions for the development of
river transportation**

Dmitry V. Dreiband

ORCID: 0000-0003-0136-2495

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Currently, the leadership of our country is paying more and more attention to improving the efficiency of using its unique geographical potential, developing river transportation and port infrastructure. Increasing the attractiveness and attracting investments in this field of activity is possible by providing special economic conditions in coastal water transport hubs by creating business incubators, technology parks, and port special economic zones on their territory. It is advisable to modernize the river infrastructure throughout the country centrally based on the formation of an integrated port support system that meets a single concept and standards. It is proposed to implement the above measures by creating a state corporation capable of carrying out the necessary modernization of the port infrastructure on a national scale and providing favorable conditions for the work of various organizations.

Keywords: river transport, port infrastructure, special economic zones, business incubators, technology parks, state corporations.

Введение

В настоящее время с учётом изменения макроэкономической ситуации всё большее внимание со стороны государства уделяется вопросам развития водного транспорта. Российская Федерация (далее – РФ) занимает второе место в мире по протяженности внутренних водных путей (128 тыс. км – КНР, 102 тыс. км - РФ). Однако несмотря на уникальный географический потенциал объём речных перевозок в последние годы не достигает высоких показателей (рис. 1), не превышает 120 млн тонн в год [1]. Для сравнения чуть более 30 лет назад перевозки внутренним водным транспортом (далее - ВВТ) в нашей стране достигали более 500 млн. тонн в год.

Доля перевозок ВВТ в общем объёме перевозок составляет менее 2%, в то время как на автомобильный транспорт приходится более 65%, на железнодорожный – свыше 17% [2].

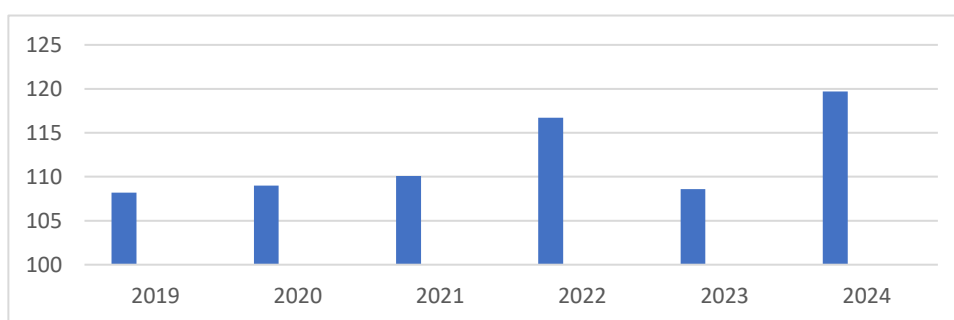


Рис. 1. Объём перевозок внутренним водным транспортом в период с 2019 по 2024 годы, млн. т

Всё это свидетельствует о необходимости принятия мер на государственном уровне для исправления ситуации и повышения привлекательности деятельности в сфере речных перевозок. Одним из направлений и предложений по увеличению объёма перевозок ВВТ является создание инновационного механизма развития речной портовой инфраструктуры. Расширение доли речных перевозок в грузообороте является логичным и перспективным вариантом развития экономики страны. Решение данной задачи представляется возможным при создании условий для привлечения инвестиций в речную портовую инфраструктуру, проведении масштабной модернизации прибрежной инфраструктуры внутренних водных путей, формировании комплексной опорной системы портов, соответствующей единой концепции и стандартам.

Сегодня в России действует около 180 портов, из которых 117 расположены в речных акваториях. Всего активно осуществляют свою деятельность 30 портов, в том числе 14 речных [3]. Реализация вышеуказанных предложений, по мнению автора, возможна в страновом масштабе при обеспечении со стороны государства единого централизованного процесса управления и координации в портах деятельности бизнес-структур, организаций и ведомственных учреждений, а также формирование в портах необходимой инфраструктуры и привлекательных условий для работы различных организаций транспортно-логистического комплекса и других сфер деятельности.

Порты по всей стране должны стать местом аккумуляции различных бизнес-структур и организаций, деятельность которых связана в той или иной степени с транспортно-логистическими услугами (перевозочными, экспедиторскими, стивидорскими, финансовыми, инвестиционными, дилерскими, производственными,

консалтинговыми и т.п.). Соответственно инфраструктура в портах должна способствовать развитию благоприятных условий для эффективного взаимодействия вышеназванных организаций.

Практическая реализация данных предложений представляется от простого к сложному, от создания бизнес-инкубаторов в портах до формирования портовых особых экономических зон (далее – ПОЭЗ) и государственных корпораций.

Целью настоящего исследования является провести анализ влияния особых экономических условий на развитие речной терминальной инфраструктуры. В ходе данного исследования поставлены следующие задачи: проанализировать направления и особенности применения бизнес-инкубаторов, технопарков, ПОЭЗ для привлечения инвестиций в речную терминальную инфраструктуру, оценить потенциальный экономический эффект от создания ПОЭЗ и его влияние на уровень социально-экономического развития региона, проанализировать возможность создания государственной корпорации для восстановления и модернизации речной портовой инфраструктуры.

Методы и материалы исследования

В процессе написания данного исследования были изучены и проанализированы публикации, посвященные деятельности особых экономических зон, бизнес-инкубаторов, технопарков и госкорпораций. Проведена группировка полученных результатов и рассмотрены наиболее актуальные научно-методические подходы и рекомендации в сфере государственно-частного партнерства, способные качественно повлиять на развитие речных перевозок и объектов инфраструктуры внутреннего водного транспорта.

В основу исследования вошли данные официальной статистики, отраслевых изданий, использованы методы группировки и классификации, сравнительно-аналитические методы, а также представлена оценка прогнозируемых результатов на основе метода постоянного роста.

Результаты и обсуждение

В настоящее время в России функционируют 59 особых экономических зон (далее – ОЭЗ), в том числе 2 портовые, 7 технико-внедренческих, 11 туристско-рекреационных, 39 промышленно-производственных. В ОЭЗ зарегистрировано 1300 резидентов, объем вложенных инвестиций составил свыше 2,7 трлн рублей, создано более 108 тысяч рабочих мест, уплачено порядка 652 млрд рублей налоговых платежей, таможенных отчислений и страховых взносов.

Одним из направлений возможного роста речных перевозок и развития портовой инфраструктуры, по мнению автора, является создание на прибрежной территории бизнес-инкубаторов.

Деятельность бизнес-инкубатора направлена на формирование условий для ускоренного развития и внедрения в экономику страны инновационных технологий, а также выстраивания взаимовыгодных экономических отношений между государственными органами власти и коммерческими структурами, субъектами малого и среднего предпринимательства (далее - МСП).

Бизнес-инкубаторы представляют собой специализированную инфраструктуру, внутри которой возможно получение комплексной поддержки по льготным пониженным тарифам и ставкам юридических, консультационных, финансовых, бухгалтерских, рекламных и арендных услуг, направленных на оказание помощи предпринимателям и коммерческим структурам в начальный период становления. Наиболее востребованными являются консультации по вопросам налогообложения, кредитования, бухгалтерского учета, правовой защиты, бизнес-планирования, повышения квалификации и обучения (рис.2) [4].

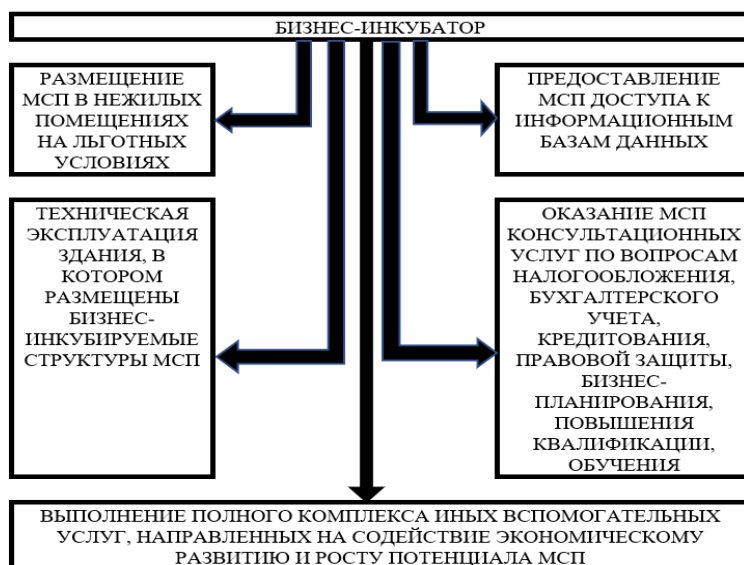


Рис. 2. Основные меры поддержки в бизнес-инкубаторе

Более комплексными и фундаментальными, с точки зрения инфраструктурного и научно-технического подхода, по продвижению и внедрению в широкое производство инноваций и опытных разработок являются технопарки.

В Постановлении Правительства Российской Федерации от 30.10.2014 № 1119 «Об отборе субъектов РФ, имеющих право на получение государственной поддержки в форме субсидий на возмещение затрат на создание инфраструктуры индустриальных парков и технопарков» определено, что технопарк – это комплекс инновационной инфраструктуры, обеспечивающий полный цикл услуг по размещению и развитию новых инновационных компаний.

Основной целью технопарков является обеспечение ускоренного роста инновационных компаний в приоритетных для государства отраслях, в том числе транспортной.

Стратегической задачей технопарков является стимулирование деятельности малого и среднего бизнеса по реализации новых идей и наукоёмких технологий (рис. 3). Как правило, внутри технопарка формируются несколько функциональных направлений: бизнес-инкубаторы, инжиниринговые площадки и центры кластерного развития [5].



Рис. 3. Основные преимущества технопарка

Отдельно необходимо отметить роль и значение действующих в стране особых экономических зон (далее – ОЭЗ), на территории которых предоставляются особые экономические преференции для деятельности бизнес-структур (налоговые и таможенные льготы, выгодные условия по аренде помещений и земельных участков, отсутствие административных «барьеров»), а также для формирования благоприятного инвестиционного климата [6].

В соответствии с законодательством Российской Федерации на территории страны действуют 4 основных типа ОЭЗ и 1 - особенная (рис. 4).



Рис. 4. Типы особых экономических зон

Портовую особую экономическую зону (далее – ПОЭЗ) целесообразно создавать в местах тяготения крупных транспортных потоков, рядом с магистральными дорогами (железнодорожными, автомобильными) и судоходными путями, а также морскими, речными и авиационными портами.

По мнению автора, ПОЭЗ должны создаваться во всех ключевых транспортных узлах страны, расположенных рядом с судоходными водными путями.

На данной территории должна осуществляться качественная настройка работы транспортных, логистических, экспедиционных, стивидорных, судоремонтных,

судостроительных, научно-производственных, финансовых и многих других организаций, необходимых для взаимовыгодного функционирования ПОЭЗ (рис.5) [7].

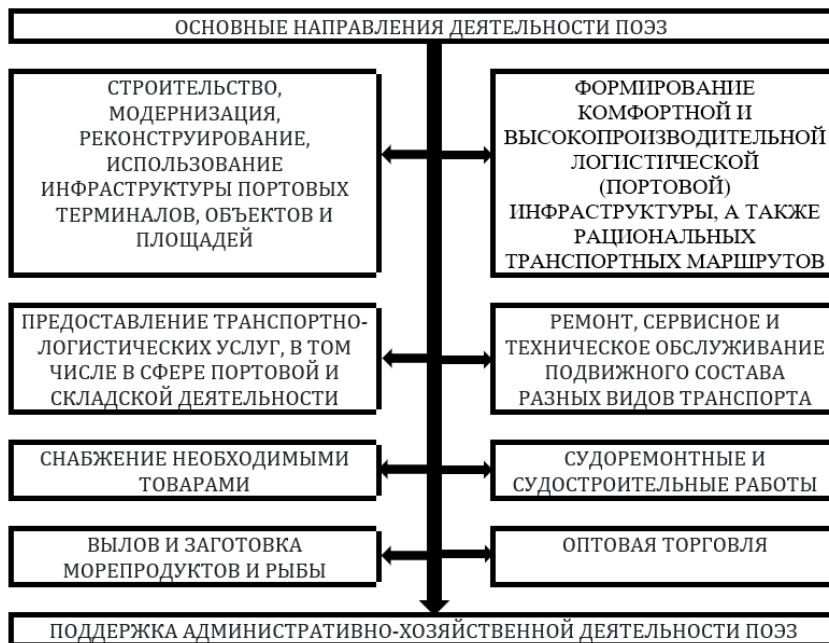


Рис. 5. Основные направления деятельности ПОЭЗ

Основными задачами ПОЭЗ являются развитие транспортно-логистической инфраструктуры территории региона и наиболее рациональное использование его географического положения, повышение конкурентоспособности товаров и услуг, создание новых рабочих мест, привлечение крупных объёмов инвестиций в экономику региона и страны в целом, способствующих ускорению достижения технологического и социального прогресса [8].

Рассмотренные варианты, мероприятия и предложения по комплексному развитию речных перевозок и повышению уровня их инвестиционной привлекательности целесообразно оценить, определить их значимость и уровень влияния на экономику региона и государства в целом. При этом важно понять синергетический эффект вышеуказанных мероприятий не только на экономические, но и на социальные, демографические, гуманистические процессы [9].

Предлагается провести оценку социально-экономической значимости от реализации каждого проекта на территории ПОЭЗ с целью выявления общего показателя уровня социально-экономического развития региона.

Начать определение перспективного планируемого синергетического эффекта привлечения инвестиций в региональную экономику, полученного при создании ПОЭЗ, предлагается с формулы 1.

$$I_{\text{ПОЭЗ}} = \sum_{i=0}^n I(\text{внутр}) + \sum_{i=0}^n I(\text{внеш}), \quad (1)$$

где $i = n$ – количество инвестиционных проектов;

$I(\text{внутр})$ – объём инвестиций в проекты на территории ПОЭЗ, руб;

$I(\text{внеш})$ – объём инвестиций в проекты вне ПОЭЗ, но на территории региона, возникших вследствие реализации проектов ПОЭЗ, руб.

Общий объём инвестиций в региональную экономику с учетом реализации проектов на территории ПОЭЗ предлагаем посчитать, используя формулу 2. Показатели по динамике и объёму в основной капитал по полному кругу хозяйствующих субъектов получены на основе данных Территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Нижегородской области (далее - Нижегородстат) [11].

$$I_{\text{общ}} = I_{\text{рег}} + I_{\text{ПОЭЗ}}, \quad (2)$$

где $I_{\text{рег}}$ – объём инвестиций в экономику региона, без учета инвестиций в ПОЭЗ;
 $I_{\text{ПОЭЗ}}$ - объём инвестиций при создании ПОЭЗ.

Количество привлеченных инвестиций непосредственно оказывает влияние на динамику валового регионального продукта (далее – ВРП). Существует несколько подходов к определению ВРП. Различают три основных метода исчисления ВРП – это производственный метод, метод формирования по источникам доходов и метод конечного использования [10].

По оценкам экспертов объём прямых инвестиций в создание ПОЭЗ может достигать до 2% ВРП, а синергетический эффект до 5% ВРП [12].

В нашем случае обратимся к определению ВРП с помощью метода конечного использования (формула 3).

$$\text{ВРП} = I_{\text{общ}} + П + Э, \quad (3)$$

где $П$ – конечное потребление (включает в себя расходы домашних хозяйств и некоммерческих организаций, а также расходы государственного управления) [12], руб;

$Э$ – чистый экспорт (определяется как разница между экспортом и импортом товаров и услуг во внутренних ценах) [12], руб.

В соответствии с Федеральным законом от 22.07.2005 № 116-ФЗ «Об особых экономических зонах в Российской Федерации», чтобы стать резидентом ПОЭЗ требуется вложить не менее 400 млн. рублей инвестиций при строительстве объектов инфраструктуры, не менее 120 млн. рублей при реконструкции. При этом в течение первых трёх лет в рамках указанных вложений компания-резидент должна проинвестировать не менее 40 млн. рублей.

По данным департамента регионального развития Министерства экономического развития Российской Федерации по состоянию на конец 2024 года на территории России действуют 2 ПОЭЗ, в которых насчитывается 57 компаний-резидентов с объёмом инвестиций 22,2 млрд. рублей.

Рассчитаем прогнозируемый уровень ВРП при создании ПОЭЗ в Нижегородской области. По данным АО «Корпорация развития Нижегородской области» в создание ПОЭЗ планируется привлечь более 10 млрд. рублей, а ежегодный объём прироста инвестиций составит свыше 1 млрд. рублей [13]. Данные по размеру ВРП за предыдущие годы примем по информации Нижегородстата, министерства финансов Нижегородской области [14].

Таким образом результаты определения данного показателя на основе проведенного статистического анализа и расчётов в табличном редакторе MS Excel представлены на рис.6.

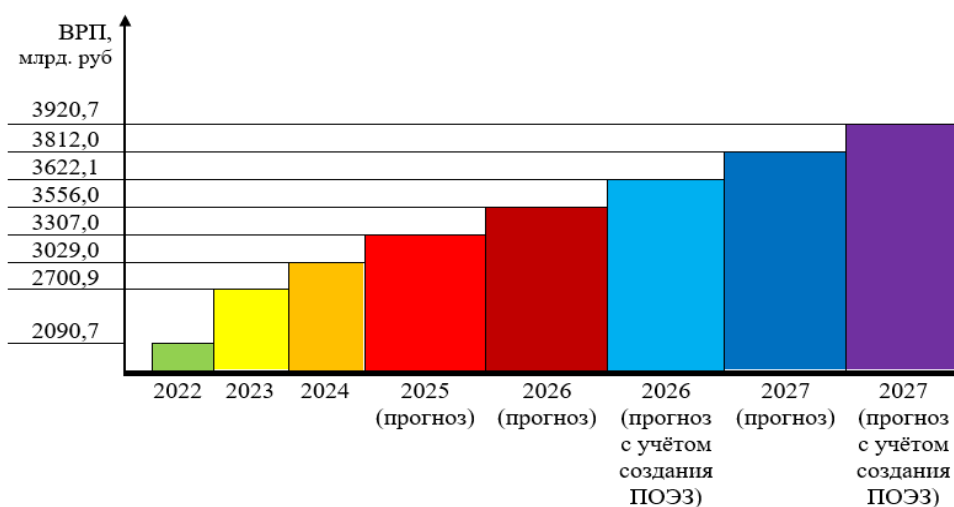


Рис. 6. Прогнозируемый уровень ВВП при создании ПОЭЗ в Нижегородской области

В конечном итоге динамика ВВП тесно связана с уровнем социально-экономического развития региона (далее – УСЭРР). УСЭРР определим, используя стоимостной подход, на основе модели Гордона (формула 4) [15].

$$УСЭРР = \frac{ВВП * (1 + q)}{(r - q)}, \quad (4)$$

где q – показатель ожидаемого роста региона (кроме экономических в себя включает социальные, демографические, гуманистические показатели);
 r – ставка дисконтирования.

Вычисление показателей УСЭРР при создании ПОЭЗ на примере Нижегородской области будет являться предметом отдельных исследований.

Масштабность и капиталоемкость проектов по созданию ПОЭЗ требует тщательного подхода к реализации, детальной проработки организационных механизмов и взвешенного нормативно-правового государственного регулирования.

Автором рассмотрен и предложен перспективный путь инновационного развития портовых территорий страны, от создания бизнес-инкубаторов до ПОЭЗ. Получить требуемый эффект от функционирования данных структур возможно только при грамотном и эффективном управлении. По мнению автора, должным образом справиться с такой задачей в полной мере в страновом масштабе способна такая форма организации и управления как государственная корпорация.

В Российской Федерации госкорпорацией является некоммерческая организация, созданная для развития реального сектора российской экономики путём реализации управленческих, социальных и иных общественно-полезных функций (рис.7). Имущество, переданное Российской Федерацией госкорпорации, становится её собственностью [16].

Основными целями госкорпорации являются реализация страновых экономических и социальных задач, повышение результативности национальных проектов и федеральных программ, создание высокотехнологичных и конкурентоспособных производств, оборудования, продукции и услуг [17].

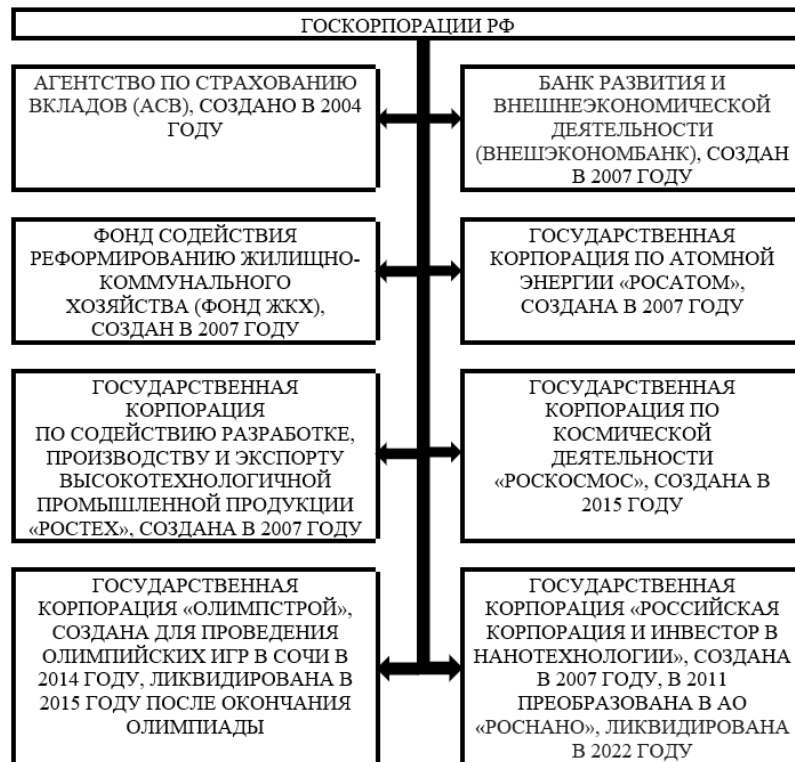


Рис. 7. Перечень государственных корпораций России

Основной задачей создания государственных корпораций является развитие отдельных направлений деятельности отраслей экономики, которые имеют стратегическое значение для социальной и хозяйственной жизни страны и низкую привлекательность со стороны частных инвесторов. Восстановление некоторых сфер Российской экономики невозможно без поддержки государства [18].

В то же время роль государства не должна сводиться только к предоставлению льгот, субсидий, дотаций и субвенций. Необходимо грамотное и эффективное управление активами и объектами государственной собственности с целью достижения плановых социально-экономических показателей и прибыли.

Госкорпорации создаются для реализации крупных капиталоемких проектов. Они основывают свою деятельность на механизмах государственно-частного партнерства, аккумулируют методы государственного регулирования и коммерческого управления с инновационным подходом для решения крупных социально-экономических проблем в различных отраслях народного хозяйства. Прибыль от коммерческой деятельности и использования государственного имущества, как правило, направляется на общественно-полезные цели [19].

В частности, государственные корпорации могут быть рассмотрены как эффективный механизм модернизации и восстановления отдельных отраслей народного хозяйства, в том числе речного транспорта и портовой инфраструктуры, а также катализатором роста частных инвестиций в данную сферу деятельности.

Заключение

Приведенное исследование свидетельствует о необходимости принятия мер на государственном уровне для повышения привлекательности деятельности в сфере речных перевозок, создании инновационного механизма развития речной портовой

инфраструктуры, проведении масштабной модернизации прибрежной инфраструктуры внутренних водных путей.

По мнению автора, особые экономические условия ведения хозяйственной деятельности должны создаваться во всех ключевых воднотранспортных узлах страны на основе формирования комплексной опорной системы портов, соответствующей единой концепции и стандартам.

Создание государственной корпорации инновационного развития портовых территорий страны позволит грамотно и эффективно управлять объектами государственной собственности, а также расположенными на их территории бизнес-инкубаторами, технопарками и портовыми особыми экономическими зонами. Госкорпорация может быть рассмотрена как эффективный механизм модернизации и восстановления инфраструктуры водного транспорта, а также привлечения дополнительных инвестиций в речные перевозки.

Список литературы

1. Федеральная служба государственной статистики (Росстат) [Электронный ресурс]. – режим доступа: <https://rosstat.gov.ru/search?q=перевозки> (дата обращения: 15.03.2025).
2. Дрейбанд Д.В., Коршунов Д.А., Ничипорук А.О. Развитие инфраструктуры внутреннего водного транспорта: стратегические задачи, проблемы и перспективы // Научные проблемы водного транспорта. №74(1). 2023. С.96-104.
3. Федеральное агентство морского и речного транспорта (Росморречфлот) [Электронный ресурс]. – режим доступа: https://morflot.gov.ru/deyatelnost/napravleniya_deyatelnosti/portyi_rf/ (дата обращения: 18.03.2025).
4. Сарапкина Т.А. Бизнес-инкубатор как инструмент успешного развития малого и среднего бизнеса // Электронный научный журнал «ГосРег». №4. 2016. С.127-135.
5. Смирнова Е.А. Оценка значимости поддержки резидентов технопарков в регионах России // Сборник научных трудов «Проблемы преобразования и регулирования социально-экономических систем» ИПРЭ РАН. 2022. С.143-149.
6. Особые экономические зоны. Министерство экономического развития Российской Федерации. Департамент регионального развития. 2024 [Электронный ресурс]. – режим доступа: https://www.economy.gov.ru/material/directions/regionalnoe_razvitie/instrumenty_razvitiya_territory/osoby_economicheskie_zony/?ysclid=m7ycb1vlcb321726704 (дата обращения: 20.03.2025).
7. Дробот Е.В., Макаров И.Н., Авцинова А.А., Журавлева О.В. Совершенствование методики экспертной оценки бизнес-плана проекта для резидентов особых экономических зон // Экономические отношения. 2019. № 2. С. 1137-1150.
8. World Free Zones Organization. [Электронный ресурс]. – режим доступа: <https://www.worldfzo.org> (дата обращения: 26.03.2025).
9. Булавко О.А. Особые экономические зоны как катализатор развития Российской промышленности // Экономика, предпринимательство и право. 2020. № 4. С.987-996.
10. Давыдова О.А. Оценка развития транспортной инфраструктуры региона (на примере города Москвы) // Региональная экономика и управление: электронный научный журнал. №2 (66). 2021. [Электронный ресурс]. – режим доступа: <https://eee-region.ru/article/6607/> (дата обращения: 27.03.2025).
11. Доклад «Социально-экономическое положение Нижегородской области», январь-декабрь 2024 года (2 часть). Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Нижегородской области. [Электронный ресурс]. – режим доступа: <https://52.rosstat.gov.ru/folder/36748> (дата обращения: 20.03.2025).
12. Михеева Н.Н. Оценка сценариев пространственного развития Российской экономики до 2030 года // Науч. труды: ИНИ РАН. М.: МАКС Пресс, 2017. С. 405–423.
13. Инвестиционная инфраструктура. АО «Корпорация развития Нижегородской области». [Электронный ресурс]. – режим доступа: <https://nn-invest.ru/climate/infrastructure/> (дата обращения: 12.02.2025).
14. Бюджет для граждан по проекту областного бюджета и принятому бюджету. Министерство финансов Нижегородской области. [Электронный ресурс]. – режим

- доступа: https://mf.nobl.ru/index.php?option=com_k2&view=item&id=1599:byudzheta-grazhdan-po-proektu-oblastnogo-byudzheta-i-po-prinyatomu-byudzhetu&Itemid=553 (дата обращения: 05.04.2025).
15. Суковатова О.П. Оценка уровня социально-экономического развития региона на основе стоимостного подхода // Гуманитарные науки. Экономика. Вестник ТГУ. 2008. №12(68). С.500-504.
 16. Котенко А.В. Об участии государственных корпораций в инновационном процессе как приоритетном направлении их деятельности // Экономические науки. 2008. № 7. С. 206-209.
 17. Crown Corporations Defined // Investopedia. 08.01.2018. [Электронный ресурс]. – режим доступа: <https://www.investopedia.com/terms/c/crowncorporation.asp>. (дата обращения: 28.03.2025).
 18. Эргашев А.С. Роль государственных корпораций в экономике России (на примере государственных корпораций «Росатом» и «Ростех») // Вестник РУДН. Серия: государственное и муниципальное управление. 2020. №7(4). С.303-315.
 19. Банников С.А. Создание государственных корпораций с целью более эффективного управления государственными ресурсами // Вестник университета. 2023. № 5. С.5-12.

References

1. Federal State Statistics Service (Rosstat) [Elektronnyi resurs]. – Rezhim dostupa: <https://rosstat.gov.ru/search?q=perevozki> (data obrashcheniya: 15.03.2025).
2. Dreiband D.V., Korshunov D.A., Nichiporuk A.O. Development of Inland Water Transport Infrastructure: Strategic Tasks, Problems and Prospects // Scientific Problems of Water Transport. No74(1). 2023. P.96-104.
3. Federal Agency of Maritime and River Transport (Rosmorrechflot) [Elektronnyi resurs]. – Rezhim dostupa: https://morflot.gov.ru/deyatelnost/napravleniya_deyatelnosti/portyi_rf/ (data obrashcheniya: 18.03.2025).
4. Sarapkina T.A. Business Incubator as a Tool for the Successful Development of Small and Medium Business : Electronic Scientific Journal "GosReg". No4. 2016. P.127-135.
5. Smirnova E.A. Assessment of the Importance of Support for Technopark Residents in the Regions of Russia Collection of Scientific Papers "Problems of Transformation and Regulation of Socio-Economic Systems" IPRE RAS. 2022. P.143-149.
6. Special Economic Zones. Ministry of Economic Development of the Russian Federation. Department of Regional Development. 2024 [Elektronnyi resurs]. – rezhim dostupa: https://www.economy.gov.ru/material/directions/regionalnoe_razvitie/instrumenty_razvitiya_territoriy/osoby_e_ekonomicheskie_zony/?ysclid=m7ycb1vcb321726704 (data obrashcheniya: 20.03.2025).
7. Drobot E.V., Makarov I.N., Avtsinova A.A., Zhuravleva O.V. Improvement of the methodology of expert assessment of the project business plan for residents of special economic zones. 2019. № 2. Pp. 1137-1150.
8. World Free Zones Organization. [Electronic resource]. – Available at: <https://www.worldfzo.org> (accessed: 26.03.2025).
9. Bulavko O.A. Special Economic Zones as a Catalyst for the Development of the Russian Industry // Economics, Entrepreneurship and Law. 2020. № 4. Pp. 987-996.
10. Davydova O.A. Assessment of the development of transport infrastructure of the region (on the example of the city of Moscow) // Regional Economics and Management: Electronic Scientific Journal. №2 (66). 2021. [Electronic resource]. Available at: <https://ee-region.ru/article/6607/> (accessed: 27.03.2025).
11. Report "Socio-economic situation of the Nizhny Novgorod region", January-December 2024 (part 2). Territorial body of the Federal State Statistics Service for the Nizhny Novgorod Region. [electronic resource]. – Access mode: <https://52.rosstat.gov.ru/folder/36748> (date of application: 03/20/2025).
12. Mikheeva N.N. Assessment of scenarios for the spatial development of the Russian economy until 2030 // Scientific papers: INP RAS. Moscow: MAKS Press, 2017. pp. 405-423.

13. Investment infrastructure. Nizhny Novgorod Region Development Corporation JSC. [electronic resource]. – Access mode: <https://nn-invest.ru/climate/infrastructure/> (date of appeal: 02/12/2025).
14. Budget for citizens according to the draft regional budget and the adopted budget. Ministry of Finance of the Nizhny Novgorod region. [electronic resource]. – Access mode: https://mf.nobl.ru/index.php?option=com_k2&view=item&id=1599:byudzheta-dlya-grazhdan-po-proektu-oblastnogo-byudzheta-i-po-prinyatomu-byudzhetu&Itemid=553 (accessed 05.04.2025).
15. Sukovatova O.P. Assessment of the Level of Socio-Economic Development of the Region on the Basis of the Cost Approach : Humanities. Economics. Vestnik TSU. 2008. №12(68). Pp. 500-504.
16. Kotenko A.V. On the Participation of State Corporations in the Innovation Process as a Priority Direction of Their Activity. 2008. No 7.P. 206-209.
17. Crown Corporations Defined // Investopedia. 08.01.2018. [Electronic resource]. – Rezhim dostupa: <https://www.investopedia.com/terms/c/crowncorporation.asp>. (accessed 28.03.2025).
18. Ergashev A.S. The Role of State Corporations in the Russian Economy (on the Example of State Corporations "Rosatom" and "Rostec") // Vestnik RUDN University. Series: State and Municipal Management. 2020. №7(4). Pp. 303-315.
19. Bannikov S.A. Creation of State Corporations for the Purpose of More Effective Management of State Resources: Vestnik universiteta. 2023. № 5. P.5-12.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Дрейбанд Дмитрий Владимирович, к.э.н.,
доцент, доцент кафедры управления
транспортом, Волжский государственный
университет водного транспорта (ФГБОУ ВО
«ВГУВТ»), 603950, г.Нижний Новгород,
ул.Нестерова, 5, e-mail: dreyband_dv@inbox.ru

Dmitry V. Dreiband, Ph.D. in Economic
Science, Associate Professor, Associate Professor
of the Department of Transport Management,
Volga State University of Water Transport
(VSUVT), 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova
str., 5, e-mail: dreyband_dv@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 07.09.2025; принята к публикации 02.12.2025;
опубликована онлайн 20.03.2026. Received 07.09.2025; published online 20.03.2026.

УДК 658.788:004.8

DOI: 10.37890/jwt.vi86.680

Научно-методический подход к управлению цифровой трансформацией складской логистики

В. Н. Костров¹

ORCID: 0000-0002-8703-6713

Н.А. Барина¹

ORCID: 0009-0009-2378-6425

Д.Н. Сухарев²

ORCID: 0000-0002-8255-3017

¹*Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия*

²*АО «Русатом Оверсиз», г. Москва, Россия*

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена вызовами цифровой трансформации складской логистики, для которых существующие научные подходы носят фрагментарный характер, фокусируясь на отдельных технологиях без учета системных организационных и кадровых изменений. Целью работы является разработка комплексной методологии, обеспечивающей устойчивую цифровую трансформацию складских систем. В ходе исследования на основе теоретико-методологического анализа и сравнительного подхода были выявлены ключевые технологические тренды и семь групп системных барьеров цифровизации. В результате разработана оригинальная пятиэтапная методология, интегрирующая последовательные стадии: диагностику, внедрение технологий, оптимизацию процессов, обучение персонала и непрерывный мониторинг. Центральным научным результатом является структурированный алгоритм управления трансформацией, направленный на синергию технологических, организационных и социальных аспектов. В заключении обоснованы стратегические приоритеты для долгосрочной устойчивости преобразований: интеграция ESG-принципов, эволюционный подход к инновациям, формирование отраслевых экосистем и принцип «безопасность по умолчанию». Предлагаемая методология служит практическим инструментом для предприятий, позволяя превратить цифровую трансформацию из затратного проекта в источник устойчивого конкурентного преимущества.

Ключевые слова: складская логистика, цифровая трансформация, методология управления, цифровые технологии, ESG-принципы, устойчивое развитие, интегрированная система.

Scientific and methodological approach to managing the digital transformation of warehouse logistics

Vladimir N. Kostrov¹

ORCID: 0000-0002-8703-6713

Natalya A. Barinova¹

ORCID: 0009-0009-2378-6425

Dmitry N. Sukharev²

ORCID: 0000-0002-8255-3017

¹*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

²*Rusatom Overseas, Moscow, Russia*

Abstract. The relevance of the study stems from the challenges of digital transformation in warehouse logistics, for which the existing scientific approaches are fragmented, focusing on selected technologies without considering systemic organizational and personnel changes.

The purpose of the study is to develop a comprehensive methodology to ensure sustainable digital transformation of warehouse systems. Using theoretical and methodological analysis and a comparative approach, the study identified key technological trends and seven groups of systemic barriers to digitalization. As a result, an original five-stage methodology has been developed, integrating sequential stages: diagnostics, technology implementation, process optimization, personnel training, and continuous monitoring. The main scientific result is a structured transformation management algorithm aimed at synergizing technological, organizational, and social aspects. The conclusion substantiates strategic priorities for the long-term sustainability of the transformation: the integration of ESG principles, an evolutionary approach to innovation, the formation of industry ecosystems, and the principle of "security by default." The proposed methodology serves as a practical tool for enterprises, enabling them to transform digital transformation from a costly project into a source of sustainable competitive advantage.

Keywords: warehouse logistics, digital transformation, management methodology, digital technologies, ESG principles, sustainable development, integrated system.

Введение

Складская логистика выполняет системообразующую функцию в обеспечении непрерывности материальных потоков и оптимизации ресурсного потенциала предприятий. В условиях растущей динамики рынков и технологических изменений традиционные модели управления складским хозяйством демонстрируют снижение эффективности, что актуализирует потребность в формировании принципиально новых подходов, основанных на цифровизации и интеллектуальном управлении.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью перевода складской логистики на качественно новый уровень, обеспечивающий рост производительности, сокращение издержек и повышение надёжности цепочек поставок. Национальные инициативы, такие как программа «Цифровая экономика Российской Федерации» и государственная программа «Развитие транспортной системы», создают институциональные и инфраструктурные предпосылки для масштабного внедрения цифровых технологий в логистическую сферу.[1,2] Вместе с тем возникают комплексные вызовы, связанные с адаптацией существующих операционных моделей к требованиям цифровой эпохи.

Состояние научной дискуссии в области цифровизации складской логистики характеризуется фрагментарностью. Большинство исследований сосредоточено на анализе отдельных технологических решений — например, систем WMS, RFID, роботизированных комплексов или инструментов аналитики. При этом комплексные методологии, которые охватывают всю экосистему трансформации — включая технологическую интеграцию, организационные преобразования и кадровые изменения, — остаются недостаточно разработанными. Этот концептуальный дефицит формирует объективную потребность в исследованиях, направленных на синтез классических логистических парадигм с современными цифровыми подходами.

Критический анализ существующих исследований подтверждает указанный пробел. Например, работа Поповой Т.А., детально описывающая отдельные аспекты автоматизации складских процессов, не предлагает целостной структуры для управления цифровой трансформацией.[3] Аналогично, публикация Лобановой А.А. и Васильевой В.А., представляющая обзор разнообразных цифровых инструментов — EDI, дронов, блокчейна и «умных» очков, ограничивается их перечислением.[4]

Зарубежные исследования, такие как работа А. Хаппонен и Д. Минашкиной, вносят вклад в понимание экологического аспекта цифровизации, фокусируясь на снижении углеродного следа и энергоэффективности складов.[5] Однако даже эти прогрессивные подходы зачастую не учитывают в полной мере экономические, социальные и организационные последствия технологических изменений, такие как

трансформация трудовых процессов, требования к квалификации персонала или необходимость адаптации бизнес-моделей.

Таким образом, существует устойчивая научная проблема: преобладание узкотехнологического подхода при отсутствии комплексных методологий, способных обеспечить синергию между технологическими инновациями, экономической эффективностью, социальной ответственностью и организационной гибкостью. Для преодоления этого разрыва необходимо развитие методологии, интегрирующей многоуровневый анализ и позволяющей не только внедрять отдельные технологии, но и управлять системной трансформацией складской логистики как частью цифровой экосистемы предприятия.

Цель настоящего исследования — разработка комплексной методологии цифровой трансформации складской логистики, интегрирующей технологические, организационные и кадровые аспекты для обеспечения устойчивого повышения операционной эффективности, надёжности цепочек поставок и конкурентоспособности предприятий в условиях цифровой экономики.

Задачи исследования:

Проанализировать современное состояние и ключевые тенденции развития складской логистики в контексте цифровизации.

Выявить и систематизировать ключевые проблемы и барьеры, препятствующие успешной цифровой трансформации складской логистики.

Разработать поэтапную комплексную методологию трансформационных изменений, направленную на системное преодоление выявленных проблем и обеспечение устойчивого роста операционной эффективности.

Определить стратегические приоритеты обеспечивающие долгосрочную устойчивость цифровой трансформации.

Научная новизна исследования заключается в разработке целостного подхода к цифровой трансформации складской логистики, который преодолевает фрагментарность существующих исследований. Работа направлена на создание системной методологии, интегрирующей технологические, организационные и кадровые аспекты преобразований, а также на расширение теоретических основ логистики за счёт синтеза с концепциями устойчивого развития, управления изменениями и безопасности цифровых экосистем.

Методы исследования

Исследование базируется на комплексном применении общенаучных и специальных методов, соответствующих поэтапному решению поставленных задач. Теоретико-методологический анализ и всесторонний обзор научной литературы позволили выявить ключевые тенденции, противоречия и пробелы в области цифровизации складской логистики. Сравнительный анализ применялся для сопоставления существующих технологических решений, моделей внедрения и подходов к интеграции, что способствовало структурированию проблемного поля. Методы систематизации и классификации использовались для формирования целостной рамки анализа, объединяющей технологические, организационные и кадровые аспекты трансформации.

На этапе разработки методологии был задействован метод моделирования, основанный на принципах процессного подхода и непрерывного улучшения, что обеспечило проектирование логически связанных и последовательных этапов преобразований. Путём абстрагирования и концептуализации были сформулированы стратегические приоритеты цифровой трансформации, такие как интеграция ESG-принципов (англ. environmental, social, and corporate governance – «Экологическое, социальное и корпоративное управление») и принципа «безопасности по умолчанию». Логический и причинно-следственный анализ применялся для установления взаимосвязей между выявленными барьерами и предлагаемыми

механизмами их преодоления, а также для обоснования устойчивости и адаптивности предлагаемой методологии.

Такой многоаспектный методический аппарат обеспечил системность исследования и позволил перейти от анализа частных технологических вопросов к построению комплексной управленческой модели трансформации складской логистики в условиях цифровой экономики.

Результаты исследования

Современная складская логистика переживает период глубокой технологической трансформации, движущей силой которой является стремление к достижению операционного совершенства и устойчивости. Ключевым драйвером изменений выступает распространение комплексной автоматизации. Внедрение роботизированных систем, автономных погрузчиков и роботов-штабелёров не только сокращает время выполнения заказов и минимизирует человеческий фактор, но и переопределяет саму организацию складского пространства и потоков, повышая производительность и предсказуемость операций.[6]

Параллельно усиливается фокус на экологии, интегрирующий принципы устойчивого развития в логистические модели. Этот тренд проявляется в переходе на энергоэффективное оборудование, использовании возобновляемых источников энергии (солнечные панели), внедрении электрического транспорта и оптимизации ресурсопотребления, что способствует формированию «зелёных» складов как нового отраслевого стандарта.

Технология интернета вещей (Internet of Things, IoT) выступает основой для создания цифрового контура управления, обеспечивая сквозную видимость цепочек. Сенсоры и подключённые устройства в реальном времени передают данные о местоположении, состоянии груза и условиях хранения, что позволяет оперативно выявлять отклонения, прогнозировать риски и повышать сохранность товарно-материальных ценностей.

Решающую роль в обработке генерируемых данных играет аналитика больших данных и искусственный интеллект. Эти технологии позволяют перейти от реактивного к предиктивному и даже прескриптивному управлению запасами, точно прогнозируя спрос, оптимизируя уровни страховых запасов и автоматизируя процессы пополнения, что напрямую влияет на оборачиваемость и снижение иммобилизации капитала.

В условиях нестабильности рынков гибкость и адаптивность становятся ключевыми компетенциями. Современные складские системы должны обладать способностью к быстрой реконфигурации процессов и ресурсов в ответ на изменения спроса, рыночные ограничения или стратегические инициативы, обеспечивая непрерывность и эффективность операций.

Автоматизация и внедрение современных технологий, включая искусственный интеллект (ИИ), также являются элементами системы внутренних контролей (СВК) в складской логистике повышая их эффективность через следующие инструменты:

- *Цифровая автоматизация физического контроля:*

- RFID-технологии - использование меток RFID позволяет автоматически отслеживать перемещение товаров внутри склада, обеспечивая быстрый доступ к данным о местоположении каждой единицы продукции;
- дроны и роботы - применение беспилотников и роботизированных решений для мониторинга состояния помещений и перемещения грузов;
- интеллектуальные камеры - интеграция интеллектуальных алгоритмов обработки изображений для анализа поведения сотрудников и выявления нарушений техники безопасности.

- *Документация и электронный документооборот:*

- ERP-системы - современные ERP-решения интегрируют процессы планирования, закупок, производства и продаж, снижая вероятность ошибок и повышая прозрачность бизнес-процессов;

- электронные подписи - упрощают процесс утверждения документов и сокращают бумажный оборот;

- Big Data-аналитика - обработка больших объемов данных позволяет выявлять аномалии и отклонения в работе склада, предупреждая возможные риски.

- Использование искусственного интеллекта:

- прогностическая аналитика - машинное обучение помогает предсказывать спрос на продукцию, оптимизировать запасы и планировать поставки заранее;

- оптимизация маршрутов - AI-системы помогают эффективно распределять грузопотоки, снижая затраты на транспортировку и ускоряя доставку товаров клиентам;

- мониторинг оборудования - предиктивная диагностика состояния техники и механизмов предотвращает внезапные поломки и снижает эксплуатационные расходы.

- Повышение организационной дисциплины:

- HR-системы - автоматизация кадровых процессов способствует эффективному подбору кадров и повышению квалификации сотрудников;

- автоматизированные уведомления - сотрудники получают своевременные предупреждения о предстоящих операциях и возможных рисках;

- имитация критических ситуаций - технологии виртуальной реальности позволяют сотрудникам готовиться к нестандартным ситуациям, таким как аварии или сбои оборудования.

Сочетание цифровых технологий и методов системы внутреннего контроля существенно повышает устойчивость и управляемость складских процессов, способствуя росту общей операционной эффективности, позволяет избегать многих рисков в деятельности предприятий, уменьшать скорость выявления ошибок и несоответствий и своевременно реагировать на них, реализуя компенсирующие мероприятия.

Интегрирующим ядром цифрового склада выступают продвинутое системы управления складом (Warehouse Management System, WMS) и цифровые платформы. Они обеспечивают централизованное управление всеми процессами — от приёмки до отгрузки — на основе алгоритмов оптимального размещения, маршрутизации и учёта, создавая единую цифровую среду для принятия решений.

Таким образом, формируется новая парадигма складской логистики, где технологии выступают не просто инструментами оптимизации, а фундаментом для построения интеллектуальных, устойчивых и клиентоориентированных логистических экосистем. Однако этот трансформационный путь сопряжён с комплексом технологических, экономических и организационных вызовов, требующих системного подхода к их преодолению [7].

Ключевые проблемы цифровизации складской логистики и пути их решения:

1. Высокая стоимость внедрения

Автоматизация предполагает существенные первоначальные инвестиции в аппаратное обеспечение, программные решения, сенсорные системы и платформы для интеграции. Для предприятий малого и среднего бизнеса это создает серьезное финансовое ограничение, особенно когда требуется полная модернизация существующей инфраструктуры.

Пути решения:

- Пилотные проекты - начало с точечной автоматизации отдельных участков склада. Если технология доказала свою эффективность, её опыт тиражируется на другие участки.

- Облачные сервисы и модели SaaS (англ. software as a service — «программное обеспечение как услуга») предоставляют возможность отказаться от значительных первоначальных инвестиций в создание и поддержание собственной IT-инфраструктуры и аппаратного обеспечения.[8]

- Ожидание массовости использования данных инструментов. Всегда, чем более эксклюзивная технология, тем она дороже, чем более массовой она становится, тем дешевле в использовании. При таком подходе есть риск проиграть конкуренцию на рынке, вовремя не став более эффективным, чем конкуренты.

Принимая решение о внедрении или не внедрении данных инструментов, нужно исходить не только из финансовых возможностей, но и из понимания потенциальной выгоды от их внедрения по отношению к расходам, которые предприятие понесет.

2. Трудность объединения разнородных систем

Современные складские комплексы зачастую оперируют множеством обособленных программных решений, таких как WMS, TMS, ERP и CRM. Нередко эти системы разработаны с использованием несовместимых протоколов обмена данными, что порождает сложности при синхронизации информации и препятствует формированию целостной цифровой среды управления.

Пути решения:

- Использование международных стандартов обмена данными (например, EDI, GS1), позволяющих различным системам взаимодействовать друг с другом.

- Единые интеграционные платформы. Централизованная платформа, такая как Enterprise Service Bus (ESB), упрощает взаимодействие между различными приложениями.

3. Угроза кибербезопасности и конфиденциальности данных

Увеличение количества устройств интернета вещей (IoT) порождает новые векторы угроз. Потенциальные атаки на системы управления складскими операциями способны вызвать паралич производственных процессов, утрату информации о товарных запасах и, как следствие, существенные финансовые потери.

Пути решения:

- Многоуровневые системы защиты. Внедрение сложных схем аутентификации пользователей, включая двухфакторную проверку и биометрические методы.

- Концепция нулевого доверия (Zero Trust). Модель, исключающая доверительные отношения между компонентами системы, минимизирующая влияние потенциальных взломов.[9]

- Основной причиной нарушений конфиденциальности и киберугроз является человеческий фактор (более 90% таких случаев происходят из-за сотрудников). Данный аспект требует внимания, минимально необходимым мероприятием при этом будет выпуск соответствующих памяток для сотрудников, но для более системной работы, повышающей уровень кибербезопасности, необходимо создание службы безопасности, которая будет постоянно работать в данном направлении и противодействовать злоумышленникам. Это также повысит надежность выстраиваемой СВК, которую должен внедрять менеджмент в каждом процессе, замыкая в одну большую систему.

- Не стоит забывать и про страхование ответственности на такие случаи, как мероприятие, позволяющее не избегать данных рисков, а митигировать негативные последствия в случае их реализации.

4. Дефицит квалифицированных кадров

Современные технологии, такие как роботизированные системы, аналитические платформы и модули искусственного интеллекта, требуют сотрудников с глубокими знаниями в IT, автоматизации и логистике. Отсутствие таких специалистов замедляет

внедрение цифровых решений и увеличивает вероятность ошибок при их использовании.

Пути решения:

- Повышение квалификации сотрудников. Регулярное обучение персонала современным инструментам и технологиям.
- Привлечение студентов и молодых специалистов. Партнерство с профильными образовательными учреждениями для привлечения молодых кадров, готовых осваивать новые знания. При этом стоит учитывать социокультурный аспект нового поколения молодых специалистов, уже при приеме на работу требующих большей зарплаты, нередко даже выше той, что получают уже действующие работники. Также необходимо учитывать, что Z-поколение характеризуется особыми установками и предпочтениями, обусловленными влиянием процессов глобализации, цифровой трансформации и изменениями общественных норм и ценностей (преимущественное значение самореализации над статусом, смыслообразующая функция профессиональной деятельности, предпочтение комфортного формата рабочей среды, повышенная потребность в профессиональном развитии, низкая приверженность конкретному предприятию, автономия и свобода принятия решений).
- Повышение эффективности работы предприятия, что в свою очередь позволит увеличить доходы предприятия, часть из которых необходимо направить на повышение благосостояния рабочего коллектива, не только через увеличение заработной платы, но и создания комфортной рабочей среды, высокой корпоративной культуры и социальных программ поддержки работников и их семей, повышая таким образом привлекательность предприятия в глазах работников. Это также будет мотивировать работников к самосовершенствованию, повышению уровня своей эффективности и эффективности предприятия, приводящее к росту доходов. Таким образом, будет создан замкнутый, самоподдерживающийся процесс.

5. Дефицит качества и стандартизации данных

Отсутствие единых спецификаций для описания товарных потоков и унифицированных форматов данных снижает прогностическую способность аналитических систем и создает барьеры для межсистемной интеграции с партнерами.

Пути решения:

- Реализация стратегии Master Data Management (MDM) и стандартизация учётных процессов на корпоративном уровне.
- Применение цифровых двойников и инструментов анализа больших данных для валидации корректности и целостности информационных потоков, что способствует снижению ошибок при интеграции с внешними API и сервисами.[10]

6. Ограниченность инфраструктуры

Недостаточный уровень цифровой инфраструктуры, нестабильная связь, отсутствие сетей 5G или современных сенсорных решений, что делает невозможным эффективное применение цифровых инструментов на складах.

Пути решения:

- Инвестиции в развитие инфраструктуры. Строительство и модернизация объектов инфраструктуры, включая высокоскоростной интернет и доступные облака.
- Альтернативные способы подключения. Использование спутниковых каналов связи там, где наземные линии отсутствуют.

7. Организационные и культурные барьеры

Сотрудники нередко проявляют сопротивление к переменам, опасаясь за свои рабочие места, а руководство сталкивается с трудностями в переосмыслении бизнес-моделей.

Пути решения:

- Открытое общение. Объяснение сотрудникам выгод цифровизации и разъяснение последствий игнорирования изменений.
- Участие сотрудников в процессах изменений. Их активное привлечение к разработке и принятию решений способствует поддержке перемен.
- Переобучение и повышение квалификации сотрудников необходимы для их интеграции в автоматизированные процессы в новых ролях. При этом важно гарантировать работникам, что такое развитие карьеры не приведёт к потере рабочего места.
- Стратегию развития можно выстроить на принципе естественного сокращения численности: вакансии, освобождаемые увольняющимися или выходящими на пенсию сотрудниками, не замещаются. Постепенная автоматизация процессов в этом случае не вызовет социальной напряженности и репутационных потерь, что особенно актуально для крупных работодателей, несущих социальную ответственность.

Представленный анализ ключевых проблем подтверждает, что цифровая трансформация складской логистики представляет собой сложную многомерную задачу, выходящую за рамки точечной модернизации. Устранение отдельных барьеров не гарантирует достижения качественно нового уровня эффективности, так как успех зависит от синергетического взаимодействия всех компонентов системы. Для осуществления прорывных изменений требуется целостный подход, комплексно охватывающий технологическую, организационную и социальную составляющие.

В этой связи обоснована необходимость разработки комплексной методологии управления трансформацией.

Визуальным отражением и архитектурной основой предлагаемой методологии служит многоуровневая модель цифровой трансформации складской логистики [Рис. 6]. Данная модель систематизирует ключевые компоненты преобразований в логически связанную структуру, состоящую из четырех концентрических уровней и управляющего контура.

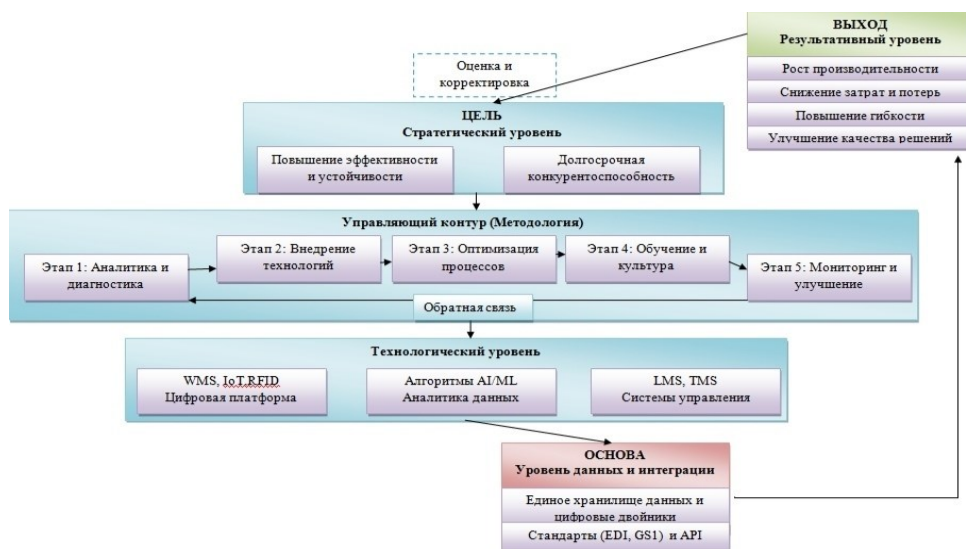


Рис. 6. Многоуровневая модель цифровой трансформации складской логистики

Фундаментальным уровнем выступает уровень данных и интеграции, включающий единое хранилище данных, цифровые двойники, а также стандарты обмена (EDI, GS1) и API. Это создает целостное и совместимое информационное пространство, необходимое для работы любых цифровых систем.

На технологическом уровне концентрируются конкретные инструменты: системы управления (WMS, TMS, LMS), технологии идентификации и сбора данных (RFID, IoT), аналитические алгоритмы (AI/ML) и цифровые платформы. Этот уровень обеспечивает автоматизацию и интеллектуализацию операций.

Управляющий контур (методология) представляет собой итеративный процесс трансформации, состоящий из пяти последовательных этапов: аналитика и диагностика, внедрение технологий, оптимизация процессов, обучение и культура, мониторинг и улучшение. Именно этот контур реализует предложенную в исследовании поэтапную методологию.

Стратегический уровень определяет системные ориентиры преобразований: повышение эффективности и устойчивости предприятия для обеспечения его долгосрочной конкурентоспособности.

Выход (результативный уровень) фиксирует конкретные измеримые результаты применения модели: рост производительности, снижение затрат и потерь, повышение гибкости и улучшение качества управленческих решений.

Все уровни модели взаимосвязаны: данные и технологии (нижние уровни) обеспечивают реализацию методологии (управляющий контур), которая направлена на достижение стратегических целей и получение конкретных операционных результатов (верхние уровни). Предлагаемая модель служит как концептуальной рамкой для планирования трансформации, так и практическим руководством к действию.

Далее детализируется содержание ключевого элемента модели – управляющего контура, то есть пятиэтапной методологии.

Стоит отметить, что автоматизация складской логистики представляет собой инвестиционный проект, направленный на повышение эффективности хранения товаров, оптимизацию процессов перемещения грузов и снижение затрат предприятия путем внедрения современных технологий автоматизации. Поэтому для повышения эффективности необходимо применить принципы управления проектами и соответствующие подходы. Предварительно четко поставить цель проекта, определить основные направления инвестирования (технологические решения, инфраструктурные улучшения, упоминавшиеся выше обучение персонала), оценить риски и выгоды от его реализации, а также провести финансовое обоснование проекта, с подготовкой достоверной финансовой экономической модели, просчитывающей срок окупаемости инвестиций.

Комплексная методология трансформационных изменений в складской логистике цифровой эпохи

Этап 1. Аналитика и диагностика текущих процессов

Цель этапа - глубокий анализ текущего состояния складских процессов и выявление проблемных зон для дальнейшего совершенствования.

Основные мероприятия:

- сбор исходных данных: подсчет объемов обработки грузов, фиксирование сроков выполнения операций, фиксация ошибок и сбоев;
- выявление узких мест: анализ выявленных проблем, установление причин по которым СВК не предотвращала их или, хотя бы, не сигнализировала об их наличии, определение слабых сторон процесса хранения и обработки товаров;
- оценка технической готовности: проверка физического состояния оборудования, инфраструктуры и уровня подготовки сотрудников к реализации цифровых решений;
- оценка выгод от внедрения: сопоставление размеров будущих затрат требуемых на модернизацию с потенциальной выгодой от их внедрения.

Результат этапа: формулировка четкого понимания существующих недостатков, ключевых направлений улучшения и предпосылок для дальнейшей цифровизации.

Грамотная диагностика позволяет оптимально спланировать дальнейшие шаги трансформации, повышая эффективность принимаемых мер.

Этап 2. Внедрение цифровых технологий

Цель этапа - техническое оснащение склада современными цифровыми инструментами для повышения точности и скорости бизнес-процессов.

Основные мероприятия:

- автоматизация управления: установка WMS-систем, обеспечивающих эффективное управление всеми операциями на складе;
- цифровая идентификация: применение технологий RFID, штрих-кодирования и сенсоров для точного учёта товара и снижения человеческих ошибок;
- роботизация: использование роботов и AGV-транспорта для ускорения перемещений и уменьшения ручного труда;
- онлайн-мониторинг показателей: формирование системы дашбордов для руководства и менеджмента, получающей информацию из озера данных в режиме онлайн;
- интеграция с корпоративными системами: синхронизация с ERP и CRM для интеграции и унификации управленческих процессов.

Результат этапа: повышение информированности менеджмента, точности и прозрачности процессов, снижение влияния человеческого фактора и рост общей продуктивности склада.

Этап 3. Обучение и изменение культуры персонала

Цель этапа - подготовить персонал к эффективной работе с новыми технологиями и сформировать культуру постоянного совершенствования.

Основные мероприятия:

- обучение и тренинги: проведение специализированных курсов и занятий для освоения новых инструментов и технологий;
- развитие цифрового сознания: формирует понимание важности данных и необходимость регулярного мониторинга показателей;
- поддержка руководства: создание благоприятной атмосферы для быстрого усвоения нововведений и мотивации сотрудников.

Результат этапа: высокий уровень профессиональной компетентности сотрудников и готовность активно внедрять и поддерживать новые подходы.

Этап 4. Оптимизация складской логистики

Цель этапа - реорганизация внутренних процессов склада для достижения максимальной эффективности на основе возможностей новых технологий.

Основные мероприятия:

- оптимизация процессов хранения: перестройка подходов к размещению товаров, учитывающих доступность и востребованность продукции;
- алгоритмы оптимизации движения: автоматическое построение наиболее эффективных маршрутов перемещения работников и техники;
- обучение и настройка роботов: работники/инженеры занимаются обучением роботизированных механизмов тем операциям, которые до этого выполняли сами, с выстраиванием их в единый конвейер;
- применение метода освоенного объема: промежуточная фиксация текущего хода выполнения модернизации, достигнутого к данному моменту результата и количества понесенных для этого затрат, с сопоставлением того что должно было

быть выполнено к этому моменту и сколько на это изначально планировалось потратить;

- применение принципов бережливого производства: минимизация потерь и устранение неэффективных действий путем внедрения инструментов бережливого производства.[11,12]

Результат этапа: значительное сокращение временных затрат и ресурсоемкости операций, увеличение пропускной способности склада, за счет наиболее рационально понесенных затрат.

Этап 5. Постоянный мониторинг и улучшение

Цель этапа - контроль результатов трансформации и принятие своевременных решений по повышению эффективности процессов.

Основные мероприятия:

- анализ данных: сбор и обработка оперативной информации с помощью специальных аналитических платформ;
- корректировка процессов: принятие обоснованных решений по оптимизации на основе объективных данных;
- регулярные совещания: периодический обмен информацией и обсуждение достигнутых результатов для внесения необходимых улучшений.

Результат этапа: устойчивый рост эффективности за счёт оперативного реагирования на возникающие проблемы и выявления резервов для роста.

Предложенная пятиэтапная методология представляет собой целостный и системный подход к цифровой трансформации, охватывающий не только техническое внедрение, но и глубокий анализ, оптимизацию процессов, а также критически важные кадровые и организационные изменения. Её поэтапная логика — от диагностики до непрерывного улучшения — обеспечивает управляемый и устойчивый переход к цифровому складу, минимизируя риски и закрепляя достигнутые результаты. Эта методология служит практическим руководством для последовательного преодоления выявленных проблем и реализации всего потенциала цифровизации.

Заключение

Цифровизация складской логистики создает мощный импульс для роста эффективности и конкурентоспособности предприятий, однако этот путь сопряжен с комплексными вызовами. Финансовые ограничения, фрагментация данных, кадровый дефицит, социальные аспекты и киберугрозы требуют не точечных исправлений, а системного переосмысления логистической модели.

Помимо решения конкретных операционных проблем, критическое значение приобретает формирование стратегических приоритетов, которые определяют устойчивость цифровой трансформации в долгосрочной перспективе.

Стратегические приоритеты цифровой трансформации:

Интеграция ESG-принципов (Environmental, Social, Governance – «Экология, Социальная ответственность, Корпоративное управление») в ядро бизнес-стратегии

Внедрение энергоэффективных технологий, использование возобновляемых источников энергии и циркулярных подходов к управлению ресурсами формирует не только «зеленый» имидж, но и экономически эффективную операционную модель.

Эволюционный подход к технологическим инновациям

Внедрение прорывных технологий (IoT, AI, Big Data) осуществляется через управляемые пилотные проекты по схеме «внедрение → оценка → масштабирование». Такой подход минимизирует риски, обеспечивает измеримую отдачу от инвестиций и сохраняет гибкость в условиях быстро меняющейся технологической среды.

Формирование отраслевых экосистем сотрудничества

Успех цифровизации зависит от способности создавать партнерские сети, объединяющие бизнес, государственные институты, научные центры и технологических провайдеров. Совместная разработка стандартов, образовательные программы и обмен лучшими практиками создают синергетический эффект для всей логистической отрасли.

Принцип «безопасность по умолчанию»

Кибербезопасность перестает быть дополнительной функцией и становится архитектурным требованием, встроенным в основу каждого цифрового решения. Реализация концепции Zero Trust и многоуровневой защиты на уровне проектирования систем обеспечивает устойчивость всей технологической инфраструктуры.

Предложенная комплексная методология трансформации, подкрепленная этими стратегическими приоритетами, представляет собой не просто план технологической модернизации, а дорожную карту перехода к логистике нового поколения. В такой модели технологическая эффективность, экологическая ответственность, кадровая развитость и безопасность образуют единый контур управления, способный адаптироваться к вызовам будущего. Именно этот целостный подход позволит компаниям превратить цифровую трансформацию из затратного проекта в источник устойчивого конкурентного преимущества.

Список литературы

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28.07.2017 N 1632-р «Об утверждении программы "Цифровая экономика Российской Федерации"// КонсультантПлюс. – URL: <https://www.consultant.ru/document> (дата обращения: 12.12.2025)
2. Постановление Правительства РФ от 20.12.2017 N 1596 (ред. от 01.12.2025) "Об утверждении государственной программы Российской Федерации "Развитие транспортной системы"// КонсультантПлюс. – URL: <https://www.consultant.ru> (дата обращения: 12.12.2025)
3. Попова Т.А. ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: СОВРЕМЕННЫЙ ВИТОК РАЗВИТИЯ СКЛАДСКОЙ ЛОГИСТИКИ // *Новое в экономической кибернетике*. 4 (Jun. 2025), 82–100. URL: <https://dongu-nec.ru> (дата обращения 12.12.2025).
4. Лобанова, А. А. Технологии будущего в складской и транспортной логистике / А. А. Лобанова, В. А. Васильева. — Текст : непосредственный // *Молодой ученый*. — 2022. — № 34 (429). — С. 14-19. — URL: <https://moluch.ru/archive/429/94623>.
5. Harpponen A., Minashkina D. Decarbonizing warehousing activities through digitalization and automatization with WMS integration for sustainability supporting operations// ResearchGate. 2019. - URL: <https://www.researchgate.net> (Дата обращения: 16.12.25)
6. Хисамов, М. А. Транспортная и складская логистика в России: главные тренды / М. А. Хисамов. — Текст : непосредственный // *Молодой ученый*. — 2024. — № 36 (535). — С. 171-173. — URL: <https://moluch.ru/archive/535/117519> (Дата обращения: 16.12.25)
7. Ирина Наумовна Кренгауз Цифровая трансформация логистики: тренды, вызовы и перспективы // *Молодой исследователь Дона*. 2025. №5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovaya-transformatsiya-logistiki-trendy-vyzovy-i-perspektivy> (дата обращения: 18.12.2025).
8. Земцова А.В., Иванова Т.В., Шевень Л.Н. Роль «облачных технологий» в логистической деятельности // *Современные научные исследования и инновации*. 2015. № 4. Ч. 3 [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2015/04/41290> (дата обращения: 27.12.2025).
9. С. С. Валеев, Н. В. Кондратьева Особенности проектирования систем безопасности на базе архитектуры нулевого доверия // *ИВД*. 2023. №8 (104). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-proektirovaniya-sistem-bezopasnosti-na-baze-arhitektury-nulevogo-doveriya> (дата обращения: 27.12.2025).
10. Лихтциндер Борис Яковлевич ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ // *T-Comm*. 2023. №8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovye-dvoyniki> (дата обращения: 27.12.2025).

11. Барина Н.А. Организация процессов складской логистики в производственной сфере на основе бережливых технологий // Инновационное развитие техники и технологий в промышленности (ИНТЕКС–2025): сборник материалов Всерос. науч. конф. молодых исследователей с междунар. участием (Москва, 17 апр. 2025 г.). Ч. 6. – М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2025. – С.137-142. – ISBN 978-5-00181-746-8.
12. Барина Н.А., Костров В.Н. Применение инструментов бережливого производства для оптимизации складской логистики: повышение эффективности и снижение потерь // Актуальные проблемы пространственного развития: материалы II междунар. науч.-практ. конф. (Нижний Новгород, 2025 г.). – Нижний Новгород: Нижегородский ин-т путей сообщения, 2025. – С.382-387. – 710 с.

References

1. Government of the Russian Federation. Rasporiazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 28.07.2017 N 1632-r «Ob utverzhdenii programmy "Tsifrovaia ekonomika Rossiiskoi Federatsii"» [Decree of the Government of the Russian Federation No. 1632-r of July 28, 2017 «On Approval of the "Digital Economy of the Russian Federation" Program»]. ConsultantPlus. Available at: <https://www.consultant.ru/document> (Accessed: 12.12.2025). (In Russ.)
2. Government of the Russian Federation. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 20.12.2017 N 1596 (red. ot 01.12.2025) "Ob utverzhdenii gosudarstvennoi programmy Rossiiskoi Federatsii "Razvitie transportnoi sistemy" [Decree of the Government of the Russian Federation No. 1596 of December 20, 2017 (ed. 01.12.2025) «On Approval of the State Program of the Russian Federation "Development of the Transport System"»]. ConsultantPlus. Available at: <https://www.consultant.ru> (Accessed: 12.12.2025). (In Russ.)
3. Popova T.A. Tsifrovye tekhnologii: sovremennyi vitok razvitiia skladskoi logistiki [Digital Technologies: A New Turn in the Development of Warehouse Logistics]. *Novoe v ekonomicheskoi kibernetike* [New in Economic Cybernetics], no. 4, pp. 82–100. (In Russ.) URL: <https://dongu-nec.ru> (Accessed 12.12.2025).
4. Lobanova, A.A., Vasil'eva, V.A. Tekhnologii budushchego v skladskoi i transportnoi logistike [Future Technologies in Warehouse and Transport Logistics]. *Molodoi uchenyi* [Young Scientist], no. 34 (429), pp. 14–19. (In Russ.) URL: <https://moluch.ru/archive/429/94623>.
5. Happonen A., Minashkina D. Decarbonizing warehousing activities through digitalization and automatization with WMS integration for sustainability supporting operations. *ResearchGate*. Available at: <https://www.researchgate.net> (Accessed: 16.12.2025).
6. Khisamov, M. A. Transportnaia i skladaskaia logistika v Rossii: glavnye trendy [Transport and Warehouse Logistics in Russia: Key Trends]. *Molodoi uchenyi* [Young Scientist], no. 36 (535), pp. 171–173. (In Russ.) URL: <https://moluch.ru/archive/535/117519> (Accessed: 16.12.2025).
7. Krengauz I.N. Tsifrovaia transformatsiia logistiki: trendy, vyzovy i perspektivy [Digital Transformation of Logistics: Trends, Challenges and Prospects]. *Molodoi issledovatel' Dona* [Young Researcher of Don], no.5. (In Russ.) URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovaya-transformatsiya-logistiki-trendy-vyzovy-i-perspektivy> (Accessed: 18.12.2025).
8. Zemtsova A.V., Ivanova T.V., Sheven' L.N. Rol' «oblastnykh tekhnologii» v logisticheskoi deiatel'nosti [The Role of "Cloud Technologies" in Logistics Activities]. *Sovremennye nauchnye issledovaniia i innovatsii* [Modern Scientific Research and Innovation], no. 4, part 3. (In Russ.) URL: <https://web.snauka.ru/issues/2015/04/41290> (Accessed: 27.12.2025).
9. Valeev, S. S., Kondrat'eva, N. V. Osobennosti proektirovaniia sistem bezopasnosti na baze arkhitektury nulevogo doveriia [Features of Designing Security Systems Based on Zero Trust Architecture]. *Inzhenernyi vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], no.8 (104). (In Russ.) URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-proektirovaniya-sistem-bezopasnosti-na-baze-arhitektury-nulevogo-doveriya> (Accessed: 27.12.2025).
10. Likhtsinder, B. Ia. Tsifrovye dvoyniki [Digital Twins]. *T-Comm* [T-Comm], no.8, pp. 30–37. (In Russ.) URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovye-dvoyniki> (Accessed: 27.12.2025).

11. Barinova N.A. Organizatsiia protsessov skladskoi logistiki v proizvodstvennoi sfere na osnove berezhivyykh tekhnologii [Organization of Warehouse Logistics Processes in the Industrial Sector Based on Lean Technologies]. Innovatsionnoe razvitie tekhniki i tekhnologii v promyshlennosti (INTEKS–2025): sbornik materialov Vseros. nauch. konf. molodykh issledovatelei s mezhdunar. uchastiem (Moskva, 17 apr. 2025 g.). Ch. 6. [Innovative Development of Engineering and Technology in Industry (INTEKS-2025): Digest of the All-Russian Scientific Conference of Young Researchers with International Participation (Moscow, April 17, 2025). Part 6.]. Moscow: FGBOU VO «RGU im. A.N. Kosygina», pp. 137–142. ISBN 978-5-00181-746-8. (In Russ.)
12. Barinova N.A., Kostrov V.N. Primenenie instrumentov berezhivogo proizvodstva dlia optimizatsii skladskoi logistiki: povyshenie effektivnosti i snizhenie poter' [Application of Lean Manufacturing Tools for Warehouse Logistics Optimization: Efficiency Increase and Loss Reduction]. *Aktual'nye problemy prostranstvennogo razvitiia: materialy II mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Nizhnii Novgorod, 2025 g.)* [Actual Problems of Spatial Development: Materials of the 2nd International Scientific-Practical Conference (Nizhny Novgorod, 2025)]. Nizhnii Novgorod: Nizhegorodskii in-t putei soobshcheniia, pp. 382–387. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Костров Владимир Николаевич, доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой логистики и маркетинга, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: vnkostrov@yandex.ru

Vladimir N. Kostrov, Doctor of Economics, Professor, Head of the Department of Logistics and Marketing, Volga State University of Water Transport, 5 Nesterov Street, Nizhny Novgorod, 603950, e-mail: vnkostrov@yandex.ru

Баринова Наталья Александровна, магистрант, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: natka.barinova.04@mail.ru

Natalya A. Barinova, master's student, Volga State University of Water Transport, 603950, Nizhny Novgorod, st. Nesterova, 5, e-mail: natka.barinova.04@mail.ru

Сухарев Дмитрий Николаевич, руководитель службы, АО «Русатом Оверсиз», 115280, Москва, ул. Ленинская Слобода, д. 26., e-mail: dnsukharev@rambler.ru

Dmitry N. Sukharev, Head of Service, Rusatom Overseas JSC, 115280, Moscow, Leninskaya Sloboda str., 26., e-mail: dnsukharev@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 03.02.2026; принята к публикации 26.02.2026; опубликована онлайн 20.03.2026. Received 03.02.2026; published online 20.03.2026.

УДК656.6

DOI: 10.37890/jwt.vi86.670

**Исследование цепей поставок
нерудных строительных материалов,
добываемых предприятиями речного транспорта**

В.В. Цверов

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0835-4615>

С.Г. Цуркан

И.С. Соловьева

В.И. Минеев

ORCID: 0000-0002-5079-7922

Волжский государственный университет водного транспорта», г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В представленной работе рассмотрены с системных позиций цепи поставок нерудных строительных материалов с участием предприятий речного транспорта. В ходе исследования дана классификация ключевых и вспомогательных участников цепей поставок нерудных строительных материалов, добываемых предприятиями речного транспорта. Определены роли предприятий речного транспорта в цепях поставок нерудных строительных материалов. Это позволило сформировать организационные модели связей между участниками типовых цепей поставок нерудных строительных материалов, добываемых предприятиями речного транспорта. Системный подход позволил выявить внутренние и внешние связи участников цепей поставок нерудных строительных материалов, что позволило определить круг организаций и предприятий, влияющих на их функционирование и устойчивость развития цепи поставок. Предложена классификация внутренних связей между фокусной компанией и другими участниками цепей поставок нерудных строительных материалов, добываемых предприятиями речного транспорта. Проклассифицированы связи цепи поставок, как логистической системы, с организациями не входящими в систему, но оказывающими на нее влияние. В работе приведены основные модели цепей поставок, в которых предприятия речного транспорта выступают в качестве фокусной компанией цепи поставок.

Ключевые слова: речной транспорт, нерудные строительные материалы, системный подход, цепь поставки, моделирование, классификация связей, поставщики, логистические посредники.

**Supply chain research non-metallic building materials, produced
by river transport enterprises**

Vladimir V. Tsverov

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0835-4615>

Sergey G. Tsurkan

Irina S. Solovyova

Valery I. Mineev

ORCID: 0000-0002-5079-7922

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract: In the presented work, the supply chains of non-metallic building materials with the participation of river transport enterprises are considered from a systemic perspective. In the course of the study, a classification of key and auxiliary participants in the supply chains of non-metallic building materials produced by river transport enterprises is given. The roles of river transport enterprises in the supply chains of non-metallic building materials are

determined. This made it possible to form organizational models of connections between participants in typical supply chains of non-metallic building materials provided by river transport enterprises. The systematic approach made it possible to identify the internal and external relationships of participants in the supply chains of non-metallic construction materials, which made it possible to identify a range of organizations and enterprises that influence their functioning and the sustainability of the supply chain. A classification of the internal relationships between the focus company and other participants in the supply chains of non-metallic building materials produced by river transport enterprises is proposed. The links of the supply chain, as a logistics system, with organizations that are not part of the system, but have an impact on it, are classified. The paper presents the main models of supply chains in which river transport enterprises act as the focal company of the supply chain.

Keywords: river transport, non-metallic building materials, system approach, supply chain, modeling, classification of connections, suppliers, logistics intermediaries.

Введение

На речном транспорте с поставками и перевозками нерудных строительных материалов (НСМ) связана большая часть предприятий. «На речном транспорте около 120 организаций занимаются поставкой нерудных строительных материалов, 70-90% из которых составляют речной песок и песчано-гравийная смесь (ПГС)» [1,2].

Добычей НСМ на речном транспорте производится из обводненных месторождений (со дна рек, озер, водохранилищ) и этой осуществляют в основном речные порты. «Доходы отдельных речных портов до 90% от их общего объема могут формироваться от поставок НСМ» [3, 4]. Кроме того, НСМ могут быть добыты и бассейновыми управлениями внутренних водных путей (БУВВП), получающими НСМ в качестве побочного продукта при углублении водных путей [5].

Речные порты кроме функции производства НСМ в цепях поставок НСМ выполняют функции перевозки по водным путям, погрузки и выгрузки из транспортных средств (судов, автомобилей, вагонов).

Кроме речных портов перевозки НСМ по водным путям осуществляют судоходные компании, при этом они участвуют в цепях поставок НСМ, как добываемых речными портами из обводненных месторождений, так и добываемых предприятиями других отраслей из сухих карьеров. «Доля НСМ на рынке транспортных услуг по перевозке грузов речным транспортом составляет около 60%» [6, 7].

Учитывая, что в современной экономике конкуренция идет на уровне цепей поставок, для предприятий речного транспорта, как выше показано, значительно связанным с добычей и перевозкой НСМ, жизненно важно участие в устойчиво-развивающихся цепях поставок.

Предприятия речного транспорта в цепях поставок НСМ могут выступать в качестве ключевых (основных) и вспомогательных участников. Согласно, теории управления цепями поставок [8, 9]:

– к ключевым относятся производители, поставщики и покупатели, т. е. те участники, которые владеют поставляемой продукцией, формируют и управляют бизнес-процессами в цепи поставок. Среди ключевых участников выделяется фокусная (центральная) компания, которая определяет структуру цепи поставок и организует управление с поставщиками и покупателями. На речном транспорте к ключевым участникам могут относиться речные порты, добывающие и поставляющие НСМ, и БУВВП, получающие НСМ в качестве побочного продукта при углублении водных путей. В части цепей поставок НСМ речные порты являются фокусными компаниями;

– к вспомогательным относятся участники цепей поставок, которые не оказывают существенного влияния на формирование и управление бизнес-

процессами в цепи поставок, а только предоставляют часть своих ресурсов ключевым участникам для выполнения ими своих операций. На речном транспорте к ним относятся судоходные компании, перевозящие НСМ, и речные порты, перегружающие и хранящие НСМ на своих складах.

Усиление конкуренции при поставках НСМ [1, 2, 4, 7] требует от участников цепей поставок соответствия возрастающим пожеланиям покупателей в части всего комплекса показателей поставок НСМ (повышения качества и ассортимента поставляемых НСМ; гарантированности поставок по срокам и объемам; снижения сроков поставок; гибкой ценовой политики; удобства взаимодействия при поставках и др.). А это в свою очередь требует устойчивого развития отдельных участников цепи поставок и цепи поставок в целом. Цепь поставок, согласно теории логистики, это макрологистическая система. Это обуславливает необходимость использования системного подхода для выявления всех влияющих на устойчивость цепи поставок НСМ внутренних и внешних факторов. Что и определило направление данного исследования.

Целью данной работы является моделирование внутренних и внешних связей в цепях поставок НСМ, для выявления факторов, влияющих на устойчивость развития цепей поставок НСМ с участием предприятий речного транспорта.

Материалы и методы

Для комплексного исследования цепей поставок НСМ с участием речного транспорта был использован системный подход в области логистики [10] и теоретические работы по управлению цепями поставок [8, 9, 11], моделированию цепей поставок [12, 13], обеспечению их устойчивого развития [14, 15]. На их основе разработаны модели логистических систем цепей поставки НСМ, добываемых предприятиями речного транспорта. Это позволяет выявить всех участников, вовлеченных в процесс поставки и определить взаимосвязи, как внутренние между звеньями цепи поставок, так и внешние с деловыми партнерами и институциональными организациями. Что позволяет, в свою очередь, выявить круг организаций, влияющих на эффективность и устойчивость развития цепей поставки НСМ, добываемых предприятиями речного транспорта. В работе [7] на основе системного подхода сформирована функциональная модель системы производства и поставки НСМ предприятием на речном транспорте, которая раскрывает модель работы одного из звеньев цепи поставок – производителя-поставщика НСМ, осуществляющего прямые поставки. Она использована авторами статьи при моделировании цепей поставок НСМ, добываемых предприятиями речного транспорта.

Результаты

В логистических системах цепей поставок НСМ в качестве подсистем выступают звенья цепи поставки: производители-поставщики; покупатели; предприятия оптовой и розничной торговли (коммерческие посредники); логистические посредники. Перед моделированием логистических систем цепей поставок НСМ, с участием предприятий речного транспорта, проклассифицируем эти звенья по функциональному участию в цепи поставки.

В качестве первого звена цепи поставки НСМ (производителя-поставщика) на речном транспорте могут быть: речные порты и БУВВП - они осуществляют добычу и поставку НСМ. При этом они могут осуществлять поставки на различных базисных условиях поставки; без обогащения добываемых НСМ или с обогащением; используя для логистических операций в ходе поставки только собственные подразделения или организуя их выполнение посредством заказа услуги логистических посредников. Их классификация приведена на рис. 1.

Ключевыми участниками на конце цепи поставок являются покупатели (рис. 2), которые в соответствии с экономическим понятием поставки (продажи продукции одним предприятием другому с гарантированием соответствия качества этой продукции, оговоренным в договоре поставки требованиям) могут быть только организации, а частные лица, приобретающие НСМ в розницу хотя в состав потребителей входят, но не входят в структуру цепи поставок. К покупателям относятся конечные потребители и предприятия, торгующие НСМ в розницу. Они подразделяются по ряду признаков:

- 1) по характеру договора поставки (с доставкой и без доставки);
- 2) по характеру использования закупаемого НСМ:
 - для производства строительных материалов (бетона, смесей с песком и бетонных изделий);
 - для использования при строительстве в качестве материального ресурса;
 - для перепродажи НСМ без их переработки (обогащения) оптом;
 - для перепродажи НСМ без их переработки (обогащения) в розницу;
 - для обогащения продажи НСМ оптом;
 - для обогащения продажи НСМ в розницу;
- 3) по наличию причалов:
 - имеющие собственный причал;
 - арендующие причальные мощности;
 - не располагающие причальными мощностями.

Логистическими посредниками в цепях поставок НСМ, добываемых предприятиями речного транспорта могут быть:

- судоходные компании, осуществляющие перевозки по внутренним водным путям;
- речные порты, осуществляющие выгрузку из судов и перегрузку в сухопутные транспортные средства;
- автотранспортные, железнодорожные и транспортно-экспедиторские компании, осуществляющие перевозку НСМ по сухопутным транспортным путям.

Целостность цепи поставок как логистической системы обеспечивается прежде всего внутренними связями между звеньями цепи поставок – информационными, финансовыми и материальными. На них строится функциональная организация цепи поставок как, системы взаимосвязанных участников.

Сформируем модели внутренних связей систем типовых цепей поставок НСМ, добываемых предприятиями речного транспорта. Наиболее распространенными для предприятий речного транспорта является прямые цепи поставок, сформированные на рис. 2 и 3.



Рис. 1. Классификация первого звена цепи поставок НСМ, добываемых предприятиями речного транспорта, – производителей-поставщиков НСМ

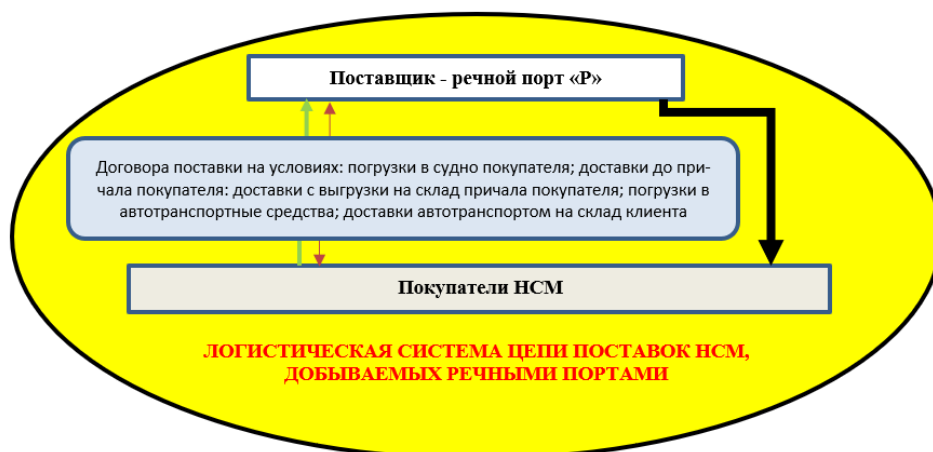


Рис. 2. Организационно модель внутренних связей цепи поставок с поставкой НСМ речными портами с фокусной компанией «поставщик – речной порт» без использования логистических посредников. Стрелками отражено направление потоков: черные – материальные потоки, зеленые – финансовые потоки, красные – информационные потоки.

Речные порты в случаях:

- 1) отсутствии достаточных мощностей для перевозки НСМ;
- 2) поставок географически удаленным покупателям;
- 3) поставок покупателям, находящихся в границах других речных портов,

– обеспечивают прямые поставки за счет включения в прямую цепь поставок логистических посредников (рис. 3), оставаясь фокусной компанией в цепи поставок. В таких цепях поставок значительно увеличивает количество внутренних связей, так как порту необходимо заключать договора на предоставление услуг с судоходными компаниями и /или другими речными портами и/или автотранспортными и транспортно-экспедиционными компаниями, контролировать их выполнение и обеспечивать оплату этих услуг.

В случаях поставок НСМ коммерческим посредникам, перепродающим НСМ оптом и в розницу, речные порты в настоящее время организуют и контролируют (являются фокусной компанией) только часть цепи поставок - до этого коммерческого посредника (рис. 4).

На остальной части цепи поставок НСМ фокусной компанией становится коммерческий посредник, который в настоящее время в основном выступает в статусе дилера. И он в этой части цепи поставок организует и контролирует взаимодействие с конечными покупателями и логистическими посредниками (заключает договора, ведет расчеты, контролирует исполнение).

Количество связей между участниками в цепях поставок НСМ с коммерческими посредниками возрастает и возможности координации всех участников цепи для производителя НСМ (речного порта) уменьшаются.

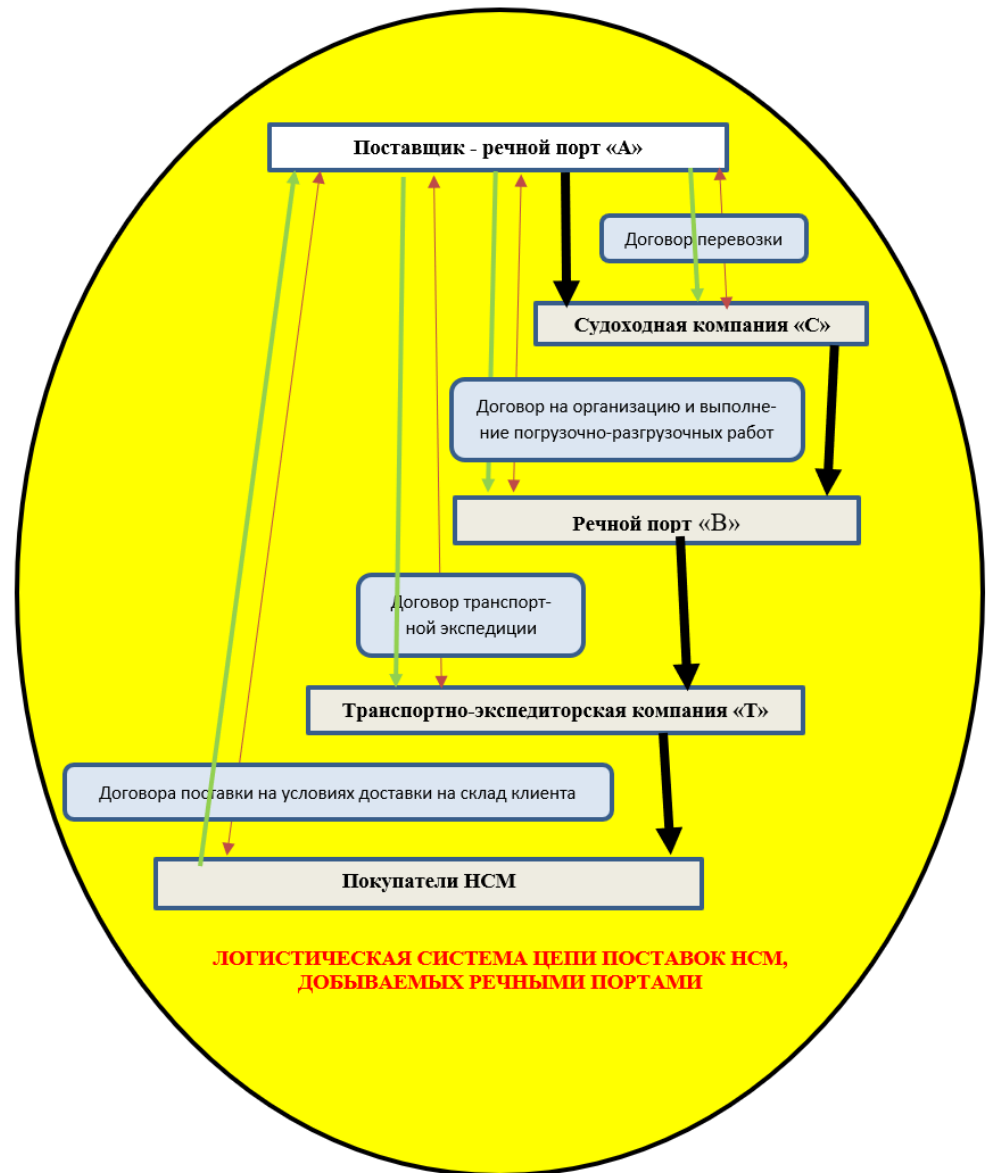


Рис. 3. Организационно модель внутренних связей прямой цепи поставок НСМ с фокусной компанией «поставщик – речной порт» с использованием логистических посредников.

Стрелками отражено направление потоков: черные – материальные потоки, зеленые – финансовые потоки, красные – информационные потоки

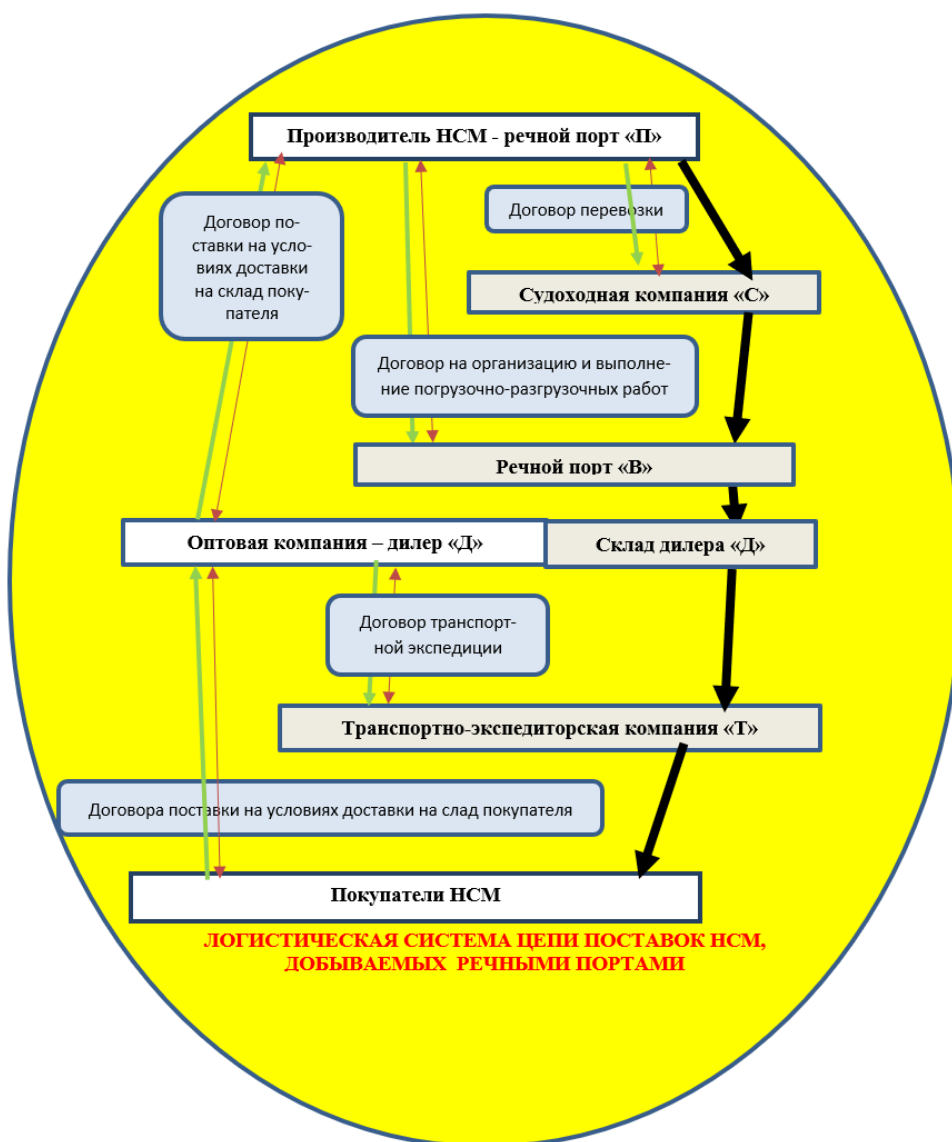


Рис. 4. Организационно модель внутренних связей цепи поставок с поставкой НСМ речными портами на условиях доставки на склад покупателя с фокусной компанией «оптовая компания – дилер» с использованием логистических посредников. Стрелками отражено направление потоков: черные – материальные потоки, зеленые – финансовые потоки, красные – информационные потоки

Эффективность цепи поставок и устойчивость ее развития зависит не только от внутренних связей, но и от внешних. Модель этих связей применительно к прямой цепи поставок НСМ, добываемых речным портом, в которой он является фокусной компанией показаны на рис. 5.

Анализ связей в моделях цепей поставок, приведенных на рис. 2-5 (а также других – не приведенных в статье) позволил выявить характерные виды связей участников цепи поставок и наличие соответствующих зависимостей от организаций, образующих эти связи.

К ним относятся связи фокусной компании с участниками цепи поставок:

– управляемые фокусной компанией (обусловленные наличием договоров поставки или услуги с фокусной компанией);

– отслеживаемые и контролируемые (обусловленные отсутствием прямых договоров фокусной компании с участниками цепи поставки, но наличием возможности влиять на них через договорные обязательства с контрагентами);

– отслеживаемые, но не контролируемые (обусловленные отсутствием прямых договоров фокусной компании с участниками цепи поставки, и отсутствием возможности влиять на них через договорные обязательства с контрагентами);

– не отслеживаемые фокусной компанией с участниками цепи поставок.

Связи с объектами, не входящими в цепь поставок, при моделировании логистической системы цепи поставок НСМ, добываемых предприятиями речного транспорта, целесообразно подразделять на:

– регламентированные государством с государственными органами (Министерство природных ресурсов и экологии; Федеральная налоговая служба; Федеральная служба речного флота; Федеральная служба речного флота);

– управляемые договорными обязательствами с организациями, не входящими в цепь поставки – финансовыми и страховыми организациями;

– управляемые договорными обязательствами с предприятиями, не входящими в цепь поставок – с поставщиками материально-технических ресурсов (топлива, запасных частей, транспортных средств, перегрузочного и складского оборудования; средств добычи и обогащения НСМ);

– отслеживаемые связи с предприятиями, входящими в другие цепи поставок НСМ (конкурирующими предприятиями по функциональным типам участников цепей поставок -добывающими НСМ предприятиями, судоходными компаниями, автотранспортными компаниями, транспортно-экспедиционными компаниями, коммерческими посредниками).

Заключение

Основные результаты исследования сводятся к ниже следующим выводам.

1. Разработана классификация звеньев цепей поставок НСМ, добываемых предприятиями речного транспорта. Она создает предпосылку к формированию типовых моделей цепей поставок НСМ, добываемых предприятиями речного транспорта, и определению факторов, влияющих на устойчивость цепей поставок НСМ с участием предприятий речного транспорта.

2. На основе системного подхода сформированы организационные модели внутренних связей для типовых цепей поставок НСМ, добываемых предприятиями речного транспорта. Они учитывают комплекс связей в цепях поставок (информационные, финансовые, материальные) между участниками. Это позволит в дальнейших исследованиях перейти к оптимизации этих цепей поставок.

3. Системный подход (в частности, разработанные модели системы цепей поставок НСМ, добываемых предприятиями речного транспорта) позволил определить круг организаций, влияющих на устойчивость развития этих цепей. Это дало возможность классифицировать типы внутренних и внешних связей цепей поставок НСМ, что в дальнейших исследованиях позволит перейти к формированию научно-методических подходов к оценке и повышению устойчивости цепей поставок НСМ, добываемых предприятиями речного транспорта.

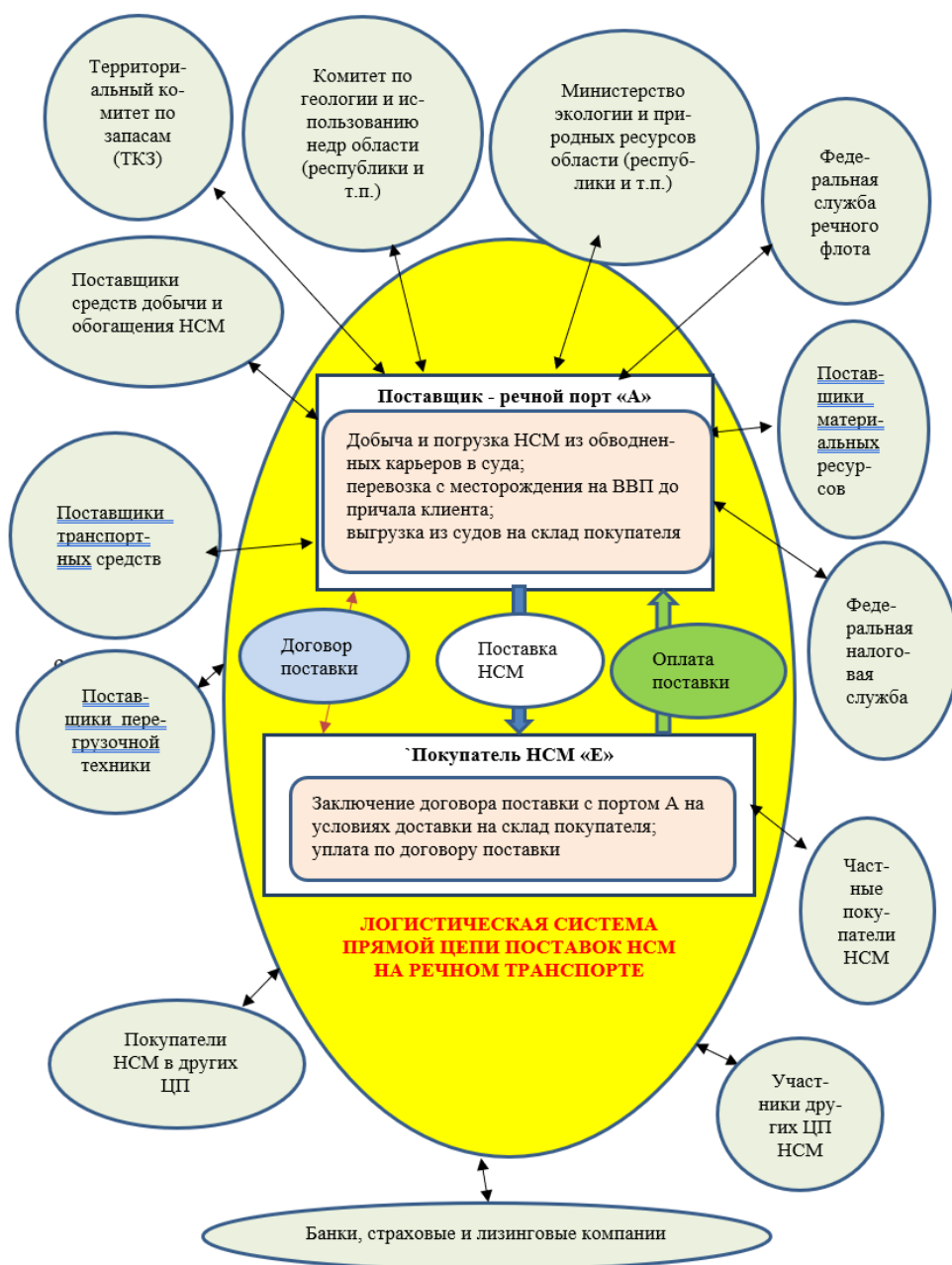


Рис. 5. Организационная модель внутренних и внешних связей в прямой цепи поставок НСМ, добываемых речным портом

Список литературы

1. Галай А.Г., Вахрушев В.Д., Фомин В.Г. Перевозки нерудных строительных материалов речным транспортом: современное состояние и перспективы // Речной транспорт (XXI век). 2016. №4. С. 32 – 35.
2. Рагулин И.А., Коршунов Д.А. Технологические аспекты повышения качества нерудных строительных материалов при их поставке предприятиями речного транспорта // Успехи современной науки. – 2017. – № 7. – С. 117-122.

3. Лисин А.А. Логистические подходы к управлению поставкой нерудных строительных материалов в речных портах // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2016. – № 46. – С. 15-20.
4. Цверов В.В., Таланова К.М. Исследование нижегородского рынка поставщиков нерудных строительных материалов. //Транспорт. Горизонты развития. 2023: Материалы международного научно-практического форума. ФГБОУ ВО «ВГУВТ». – 2023. – URL: http://vf-река-море.рф/2023/6_27.pdf
5. Лоскутов Е.Н. Техничко-экономическая эффективность совмещения дноуглубительных работ на судовом ходу с добычей нерудных строительных материалов: дисс. ... канд. техн. наук : 05.22.17. – Новосибирск, 1999. – 271 с.
6. Жендарева Е.С. Оценка эффективности функционирования речных комплексов по добыче и доставке нерудных строительных материалов: дисс. ... канд. экон. наук : 08.00.05. – Новосибирск, 2015. – 121 с.
7. Цверов, В. В., Домнина, О. Л., Мамедов, Д. И., Герби, У. (2024). Системный подход к поставкам нерудных строительных материалов на речном транспорте. Научные проблемы водного транспорта, (79), 176-189. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi79.486>
8. Левкин, Г. Г. Управление цепями поставок: интеграция и взаимодействие : учебное пособие / Г. Г. Левкин, Н. Б. Куршакова. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023 – 316 с.
9. Сергеев В. И. Управление цепями поставок : учебник для вузов / В. И. Сергеев. — Москва : Издательство Юрайт, 2024. — 480 с.
10. Семенов, А.И. Логистика. Основы теории: учебник / А.И. Семенов, В.И. Сергеев. – СПб. : Союз, 2001. – 544 с.
11. Линдерс, М.Р. Управление снабжением и запасами. Логистика / М.Р. Линдерс, Х.Е. Фирон; пер. с англ. – СПб. : Виктория плюс, 2002. – 768 с.
12. Шапиро Дж. Моделирование цепи поставок / Пер. с англ, под ред. В. С. Лукинского — СПб.: Питер, 2006. — 720 с.
13. Иванов, Д.А. Управление цепями поставок / Д.А. Иванов. - СПб.: Изд-во Политехнического, ун-та, 2009. - 660 с.
14. Шехтер Д., Сандер Г., Логистика: искусство управления цепями поставок / Пер. с англ. – М.: Претекст, 2008. – 230 с.
15. Шеффи Й. Жизнестойкое предприятие: как повысить надежность цепочки поставок и сохранить конкурентное преимущество / Йосси Шеффи; пер. с англ. - –М.: Альпина Паблшер, 2016. – 298 с.

References

1. Galai A.G., Vakhrushev V.D., Fomin V.G. Perevozki nerudnykh stroitel'nykh materialov rechnym transportom: sovremennoe sostoyanie i perspektivy // Rechnoi transport (XXI vek). 2016. №4. S. 32 – 35.
2. Ragulin I.A., Korshunov D.A. Tekhnologicheskie aspekty povysheniya kachestva nerudnykh stroitel'nykh materialov pri ikh postavke predpriyatiyami rechnogo transporta // Uspekhi sovremennoi nauki. – 2017. – № 7. – S. 117-122.
3. Lisin A.A. Logisticheskie podkhody k upravleniyu postavkoi nerudnykh stroitel'nykh materialov v rechnykh portakh // Vestnik Volzhskoi gosudarstvennoi akademii vodnogo transporta. – 2016. – № 46. – S. 15-20.
4. Tverov V.V., Talanova K.M. Issledovanie nizhegorodskogo rynka postavshchikov nerudnykh stroitel'nykh materialov. //Transport. Gorizonty razvitiya. 2023: Materialy mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo foruma. FGBOU VO «VGUVT». – 2023. – URL: http://vf-река-море.rf/2023/6_27.pdf.
5. Loskutov E.N. Tekhniko-ekonomicheskaya effektivnost' sovmeshcheniya dnouglubitel'nykh rabot na sudovom khodu s dobychei nerudnykh stroitel'nykh materialov: diss. ... kand. tekhn. nauk : 05.22.17. – Novosibirsk, 1999. – 271 s.
6. Zhendareva E.S. Otsenka effektivnosti funktsionirovaniya rechnykh kompleksov po dobyche i dostavke nerudnykh stroitel'nykh materialov: diss. ... kand. ekon. nauk : 08.00.05. – Novosibirsk, 2015. – 121 s.
7. Tverov, V. V., Domnina, O. L., Mamedov, D. I., Gerbi, U. (2024). Sistemnyi podkhod k postavkam nerudnykh stroitel'nykh materialov na rechnom transporte. Nauchnye problemy vodnogo transporta, (79), 176-189. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi79.486>

8. Levkin, G. G. Upravlenie tsepiami postavok: integratsiya i vzaimodeistvie : uchebnoe posobie / G. G. Levkin, N. B. Kurshakova. – Moskva ; Vologda : Infra-Inzheneriya, 2023 – 316 s.
9. Sergeev V. I. Upravlenie tsepiami postavok : uchebnik dlya vuzov / V. I. Sergeev. — Moskva : Izdatel'stvo Yurait, 2024. — 480 s.
10. Semenenko, A.I. Logistika. Osnovy teorii: uchebnik / A.I. Semenenko, V.I. Sergeev. – SPb. : Soyuz, 2001. – 544 s.
11. Linders, M.R. Upravlenie snabzheniem i zapasami. Logistika / M.R. Linders, Kh.E. Firon ; per. s angl. – SPb. : Viktoriya plus, 2002. – 768 s.
12. Shapiro Dzh. Modelirovanie tsepi postavok / Per. s angl, pod red. V. S. Lukinskogo — SPb.: Piter, 2006. — 720 s.
13. Ivanov, D.A. Upravlenie tsepiami postavok / D.A. Ivanov. - SPb.: Izd-vo Politekhnicheskogo, un-ta, 2009. - 660 s.
14. Shekhter D., Sander G., Logistika: iskusstvo upravleniya tsepiami postavok / Per. s angl. – M.: Pretekst, 2008. – 230 s.
15. Sheffi Y. Zhiznestoikoe predpriyatie: kak povysit' nadezhnost' tsePOCHki postavok i sokhranit' konkurentnoe preimushchestvo / Yossi Sheffi; per. s angl. - –M.: Al'pina Publisher, 2016. – 298 s.

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

Цуркан Сергей Геннадьевич, аспирант кафедры логистики и маркетинга, «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: sergei2127979@mail.ru

Sergey G. Tsurkan, postgraduate student of the Department of Logistics and Marketing, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603950, e-mail: sergei2127979@mail.ru

Соловьева Ирина Сергеевна, аспирант кафедры логистики и маркетинга, «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: www.ira00@mail.ru

Irina S. Solovyova, postgraduate student of the Department of Logistics and Marketing, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603950, e-mail: www.ira00@mail.ru

Минеев Валерий Иванович, доктор экономических наук, профессор, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5. e-mail: vlrmineev@gmail.com

Valery I. Mineev, Doctor of Economics, Professor, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterova Street, Nizhny Novgorod, 603950, e-mail: vlrmineev@gmail.com

Статья поступила в редакцию 26.12.2025; принята к публикации 26.02.2026; опубликована онлайн 20.03.2026. Received 26.12.2025; published online 20.03.2026.

УДК 338.2

DOI: 10.37890/jwt.vi86.682

Актуальные задачи обеспечения экономической безопасности региональной транспортной инфраструктуры

В.С. Чеботарев¹

ORCID: 0000-0002-2913-2360

О.Л. Морозов²

ORCID: 0000-0001-6526-2755

А.В. Дорожкин³

ORCID: 0000-0003-3578-6421

В.И. Минеев¹

ORCID: 0000-0002-5079-7922

¹*Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия*

²*Нижегородская академия МВД России, г. Нижний Новгород, Россия*

³*Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия*

Аннотация. В настоящей статье рассматриваются вопросы экономической безопасности транспортной системы региона, существующие угрозы в этой отрасли, варианты решения задач по их нейтрализации в современных условиях. Востребованность изучения данной сферы региональной экономики обусловлена тем, что наземные, воздушные, морские и речные коммуникации помимо выполнения своих прямых функций по перевозкам ещё и повышают основные региональные экономические показатели, а также улучшают условия проживания граждан. При этом рост транспортного товарооборота и перемещения населения неизбежно приводит к укрупнению и электронному насыщению логистических центров (хабов), что, в свою очередь, чревато вновь появляющимися рисками и вызовами, подвергающими опасности экономическую деятельность любого отдельно взятого субъекта Российской Федерации.

Обеспечение экономической безопасности инфраструктуры транспортных сообщений – это защита страны от предполагаемых возможных турбулентных факторов, потенциально опасных для транспортной отрасли. Все составляющие транспортной архитектуры, включая дорожную сеть, мостовые сооружения и эстакады, воздушные, морские и речные порты необходимо постоянно содержать в стабильно стандартном рабочем состоянии. Неудовлетворительное их содержание ожидаемо может привести к транспортным коллапсам и неоправданно высоким финансовым вливаниям, направленным на устранение возможных аварийных ситуаций.

Инновационные технологии, безусловно, могут повысить уровень безопасности, но, одновременно, создают предпосылки для новых вызовов. Внедрение информационно-телекоммуникационных систем управления движением предполагает обеспечение защиты от хакерских атак программных продуктов, так как неисправность такого оборудования приведёт к необратимым последствиям. Эффективная нормотворческая деятельность и правоприменительная практика в обязательном порядке снижают порог уязвимости в рассматриваемом виде экономической деятельности.

Ключевые слова: Экономическая безопасность, региональная транспортная инфраструктура, логистический центр (хаб), угрозообразующие факторы, мобильность населения, товарообращение, беспилотные виды транспорта, терминальный комплекс, внутренний туризм.

Current issues in ensuring the economic security of regional transport infrastructure

Vladislav S. Chebotarev¹

ORCID: 0000-0002-2913-2360

Oleg L. Morozov²

ORCID: 0000-0001-6526-2755

A.V. Dorozhkin³

ORCID: 0000-0003-3578-6421

Valery I. Mineev¹

ORCID: 0000-0002-5079-7922

¹*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

²*Nizhny Novgorod Academy of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Nizhny Novgorod, Russia*

³*National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia*

Abstract. This article discusses the economic security of the region's transport system, the existing threats in this industry, and the solutions to neutralize them in today's conditions. The importance of studying this area of the regional economy lies in the fact that land, air, sea, and river transportation, in addition to their primary function of transportation, also contribute to improving the main regional economic indicators and the living conditions of citizens. At the same time, the growth of transport turnover and population movement inevitably leads to the consolidation and electronic saturation of logistics centers (hubs), which, in turn, is fraught with new risks and challenges that pose a threat to the economic activities of any individual constituent entity of the Russian Federation.

Ensuring the economic security of transport infrastructure is about protecting the country from potential turbulent factors that could harm the transportation industry. All components of the transportation architecture, including road networks, bridges, and flyovers, as well as air, sea, and river ports, must be maintained in a stable and functional state. Failure to do so could lead to transportation disruptions and unnecessary financial investments to address potential emergencies.

Innovative technologies can certainly increase the level of security, but they also create new challenges. The implementation of information and telecommunication traffic control systems requires protection against software attacks, as malfunctions in such equipment can lead to irreversible consequences. Effective regulatory and enforcement practices are essential to reduce the vulnerability of this economic activity.

Keywords: Economic security, regional transport infrastructure, logistics center (hub), threat-generating factors, population mobility, goods circulation, unmanned transport, terminal complex, and domestic tourism.

Введение

При оценивании реального положения с обеспечением экономической безопасности региональной транспортной инфраструктуры в настоящее время необходимо ориентироваться на соответствующий актуальный понятийный аппарат. Формирование экономической безопасности региональной транспортной инфраструктуры целесообразно, на взгляд авторов, сформулировать как бесперебойную и стабильную деятельность имеющихся звеньев управления и видов транспортной совокупности разнообразных маршрутов сообщения, инженерных объектов, транспортных средств, логистических центров (хабов) отдельно взятой территориальной единицы, способную гарантировать эффективный экономический рост, как данного территориального образования, так и страны, в целом.

Структура организации применения мер экономической защиты транспортной инфраструктуры региона, несомненно, включает в себя такие аспекты, как создание условий для безопасной эксплуатации автомобильных, железнодорожных, воздушных, водных и иных всевозможных видов транспортных приспособлений, предназначенных для перемещений в пространстве товарной продукции и населения; предоставление удобных и верифицированных услуг по перевозке и доставке; протекционизм (в необходимой степени), чтобы отечественные предложения в рассматриваемой сфере позиционировались как более предпочтительные и выигранные, чем зарубежные; рациональное и бережное расходование существующих человеческих и технических сил и средств и другие.

Целью настоящей статьи авторы определили как обсуждение путей решения имеющихся сегодня актуальных задач обеспечения экономической безопасности региональной транспортной инфраструктуры. Для этого была изучена система мер, обеспечивающих функционирование данной инфраструктуры, были исследованы вероятные угрожающие факторы и выявлены тенденции, оказывающие в той или иной степени определенное влияние на экономическую безопасность хозяйствующих предприятий и организаций транспортной отрасли региона.

Объектом исследования при этом является региональная транспортная инфраструктура. Предметом — система обеспечения её экономической безопасности.

Методы

При подготовке предлагаемой научной работы авторами применялись следующие методы:

– метод дедукции, при использовании которого проводилось исследование от глобального понимания всей системы транспорта и её безопасности в экономическом отношении, в целом, к изучению экономической безопасности региональной транспортной инфраструктуры;

– метод комплексного системно-структурного анализа порядка обеспечения экономической безопасности транспортной инфраструктуры региона, сочетающий общий и углублённый анализ, ориентированный на динамический мониторинг и выявление причинно-следственных связей между всеми элементами этого системного образования;

– метод синтеза угроз экономической безопасности, предполагающий структурное изучение угрожающих факторов, имеющих место в рассматриваемой экономической сфере, и фиксацию их отрицательного интегрированного воздействия на инфраструктуру транспорта в регионе для выработки конструктивных предложений по их нивелированию и ликвидации;

– метод экономического анализа как набор инструментов всестороннего изучения народнохозяйственных сфер деятельности и детерминант, влияющих на них.

Эмпирическими источниками предлагаемого исследования явились аналитические и статистические сведения, опубликованные в отечественных научных изданиях, размещенных в открытом доступе.

Результаты и обсуждение

Говоря об актуальных задачах обеспечения экономической безопасности региональной транспортной инфраструктуры, представляется целесообразным обозначить следующие основные из них.

Во-первых, это задача преодоления угрожающих факторов, которые правомерно разделить на внутренние и внешние.

К внутренним угрозам относятся необратимые негативные последствия в транспортной, логистической, кадровой, финансовой, инвестиционной и инновационной деятельности региональной инфраструктуры транспорта.

К внешним угрозам экономической безопасности необходимо отнести турбулентные ситуации, связанные с социальными проблемами в сфере государственного регулирования деятельности инфраструктуры транспорта, недобросовестной конкуренцией, воспрепятствованием стабильной работе транспортных предприятий региона.

Кроме того, это противостояние экстремистским и террористическим угрозам, в том числе хакерским посягательствам в киберпространстве, подразумевающее обеспечение надёжной защиты и устойчивого функционирования средств доставки народнохозяйственных грузов и перевозки людей.

Это также угрозы, возникающие из-за природно-климатических условий и географического положения, в том числе наводнений, землетрясений, лесных пожаров и других стихийных бедствий.

К внешним же относятся угрозы санитарно-эпидемиологического и техногенного характера.

К узконаправленным видам внешних угроз следует отнести также угрозы территориального, местного и районного масштабов, касающиеся не транспортной инфраструктуры в целом, а только отдельных её сегментов [1].

Во-вторых, по-прежнему актуальной остается задача развития транспортной инфраструктуры. Составляющими частями решения данной задачи здесь будут строительные, обслуживающие и ремонтные мероприятия улично-дорожная сети (УДС), в которую входят объекты капитального строительства, предназначенные для движения транспортных средств и пешеходов, а также для обеспечения транспортных и пешеходных связей территорий населённых пунктов региона.

При проектировании УДС необходимо учитывать требования СП 42.13330.2016 (Свода правил «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений») и перспективу роста интенсивности движения транспорта и обеспечения возможности прокладки инженерных коммуникаций [2].

Так, определяющими условиями при формировании проекта УДС должны быть ожидаемые на планируемый период количество постоянного и дневного населения, рабочих мест, размеры каждодневной маятниковой миграции, взаимосвязь территорий обслуживания между собой и с центром региона и прочих обстоятельств.

Кроме того, из перечня мероприятий, оказывающих влияние на проектирование УДС, нельзя исключать имеющийся и прогнозный уровни наличия различных видов транспорта, а также распределение поездок граждан на личном и общественном транспорте в регионе.

В-третьих, – это повышение мобильности населения и товарообращения. Решение задачи увеличения скорости перемещения пассажиров и грузов однозначно приведёт региональную транспортную инфраструктуру к ощутимому экономическому и социальному эффекту для всего региона.

При этом для решения данной задачи необходимо предоставить необходимые условия и предпосылки, в том числе:

- обеспечение досягаемости всех участков местности, задействованных для размещения и использования объектов жизнедеятельности человека, всеми имеющимися видами транспорта, особенно для жителей удалённых, труднодоступных и геостратегических территорий;

- развитие действующих и строительство планируемых минерально-сырьевых центров, которые определяются как объединение разрабатываемых и прогнозируемых к разработке участков недр с полезными ископаемыми, сопряженных единой работающей и перспективной системами коммуникаций с общей исходной точкой отправки извлеченных природных ресурсов в государственный или субъектовый

транзитный комплекс (автомобильный, железнодорожный, воздушный, морской и трубопроводный транспорт) с целью передачи заинтересованным субъектам экономической деятельности, в том числе для их экспорта [3];

– совершенствование и приближение возможностей предоставления структуры транспортной логистики к их использованию соответствующей частью потребительского сообщества путём формирования целесообразного и справедливого равновесия стоимости, размеров и уровня оказываемых сервисных мероприятий, а также защищённости и сохранности при транспортировке населения и товарной массы [4].

– повышение объёма и уменьшение времени транзитных перевозок посредством разработки и применения современных мультимодальных логистических технологических инноваций, то есть постоянный поиск и внедрение новых технологий, таких как автоматизация, роботизация и искусственный интеллект, что значительно усиливает эффективность логистических операций [5].

В-четвертых, – это внедрение беспилотных видов автомобильного, железнодорожного, воздушного, морского и речного транспорта в целях обеспечения более ускоренного, бесперебойного и стабильного процесса перевозки пассажиров и грузов, что, несомненно, будет являться основой укрепления рыночной устойчивости отечественных товаров внутри страны и за её пределами.

В-пятых, – это сокращение последствий отрицательного влияния транспортной системы на состояние естественных природных показателей. При имеющемся в настоящее время особом отношении населения к экологии того или иного региона эта задача представляется более социально значимой, в том числе при стратегическом планировании промышленных предприятий и производств регионального и федерального значений.

Повышение качества транспортных услуг в части комфортности и безопасности перевозок должно, безусловно, сочетаться с минимизацией негативного воздействия на окружающую среду.

В-шестых, – это поддержание оперативной способности всей транспортной системы быть готовой к использованию при возникновении чрезвычайных ситуаций, техногенных катастроф, объявлении военного положения, а также других обстоятельств, требующих проведения неотложных мероприятий по защите страны и её граждан от возникших угроз.

В-седьмых, – это создание условий и предпосылок для предоставления населению максимально безопасного, приемлемого по ценам и оптимального по качеству обслуживания в сфере перевозок.

Эта задача решается путём обеспечения безопасности транспорта и объектов транспортной инфраструктуры, логистических центров, стратегических железнодорожных узлов, крупных морских и речных портов, шлюзов, гидроузлов, автотрасс, эстакад, мостов, а также аэродромов и вертолетных площадок, в том числе с использованием специализированных терминальных комплексов.

Под терминальным комплексом необходимо понимать совокупность промышленно-механизированных объектов, оборудованных инновационными системами, позволяющими оказывать сервисное обслуживание по сопровождению перевозки, рассредоточения и доставки товарной массы потребителям.

Он включает в себя:

- товарные хранилища;
- места для хранения контейнеров;
- парковки для вагонов;
- зоны таможенного контроля;
- места для работы представителей банковских и страховых структур, транспортно-экспедиционных компаний;
- охранные предприятия;

– кабинеты для персонала, комнаты переговоров с заказчиками и партнерами.

Терминальные комплексы строятся, как правило, в транспортно-логистических узлах, в местах, где соединяются федеральные и региональные маршруты движения различных видов транспорта.

Данные комплексы призваны обеспечить защиту, в том числе и от террористических угроз, связанных с незаконным завладением транспортными средствами, их минированием, радиационным заражением, закладкой в них взрывных устройств, и т.д. В этой связи, для обеспечения транспортной безопасности в настоящее время объективно необходимо комплексное оснащение терминалов досмотровыми и антитеррористическими системами, а также средствами радиационного контроля. Для управления безопасностью также требуется оборудовать площадки и ангары хранения транспорта техническими средствами, к которым относятся электронная сигнализация, оборудование для контроля доступа, досмотровые комплексы, средства видеонаблюдения, системы для аудио- и видеofиксации. Монтаж данного автоматизированного оборудования в транспортно-терминальных комплексах позволит предупредить и предотвратить террористические акты, несанкционированное проникновение на режимные или закрытые объекты, а также обеспечить противопожарную защиту.

При этом, системы безопасности транспортных средств могут применяться для их защиты по постановлению Правительства Российской Федерации от 26.09.2016 № 969 «Об утверждении требований к функциональным свойствам технических средств обеспечения транспортной безопасности и Правил обязательной сертификации технических средств обеспечения транспортной безопасности» [6], срок действия которого продлён до 1 сентября 2026 года. Далее вплоть до 1 сентября 2032 года будут действовать требования, утвержденные постановлением Правительства Российской Федерации от 23 декабря 2025 г. № 2107 [7].

Оборудование транспорта современными инженерно-техническими системами обеспечения транспортной безопасности является приоритетной задачей государственных структур в целях гарантии защиты страны [8].

Совершенствование архитектуры экономической безопасности региональной транспортной инфраструктуры в настоящее время невозможно без использования такого цифрового оборудования, как систем видеонаблюдения и мониторинга движения, контроля доступа и иных информационно-телекоммуникационных технологий, которые в том числе снизят порог уязвимости транспортировки пассажиров и грузов от существующих негативных факторов.

В-восьмых, – это укрепление транспортной инфраструктуры для прогрессивного продвижения внутреннего туризма в пределах как отдельно взятого региона, так и страны в целом, поскольку именно она является базисом туристической экосистемы. Необходимо уже в ближайшей перспективе устранить основные препятствия в транспортной туристической логистике и достичь большей доступности экскурсионных пунктов назначения. В этих целях решениями данной задачи могут быть:

- расширение парка региональных авиационных, железнодорожных перевозчиков и субсидирование местных рейсов так называемой «малой» авиации и поездов пригородного сообщения;
- апгрейд региональных и федеральных дорог автомобильного сообщения и модификация сети их притрассового обслуживания;
- улучшение взаимодействия органов государственной власти и субъектов транспортной отрасли региона.

Заключение

Решение обозначенных выше восьми задач позволит, по мнению авторов, увеличить скорость и качество обеспечения экономической безопасности регионального транспортного сообщения и повлияет с позитивной стороны на эффективность экономических связей, как внутрисубъектовых, так и на федеральном уровне, и подвижность населения региона.

Кроме того, нахождение вариантов решений по противодействию современным элементам турбулентности стимулирует выявление резервов повышения эффективности существующей структуры региональных перевозок, улучшит финансовые показатели и поможет в принятии аргументированных и взвешенных управленческих решений в рассматриваемой сфере экономической деятельности с учётом имеющегося в стране дефицита кадров, который в ближайшие годы, будет только нарастать и уже к 2030 году может составить, по различным оценкам, от 2 до 4 миллионов человек, что представляет собой серьёзный вызов для российской экономики в долгосрочной перспективе [9].

Обеспечение экономической безопасности объектов автотранспортной инфраструктуры является основой гарантии безопасности регионов, государства, фундаментом государственной независимости, условием прогрессивного социально-экономического развития [10].

Список литературы

1. Форрестер, С. В. Анализ факторов и угроз экономической безопасности пассажирских автотранспортных предприятий / С. В. Форрестер, Е. Н. Шурафина // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16. — № 2. — URL: <https://esj.today/PDF/51ECVN224.pdf> DOI: 10.15862/51ECVN224 (дата обращения: 30.01.2026).
2. СП 42.13330.2016. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89*: Свод правил (утв. Приказом Минстроя России от 09.06.2022 № 473/пр). – М., 2022., табл. 4.1.
3. Распоряжение Правительства РФ от 21.06.2010 N 1039-р «Об утверждении Стратегии развития геологической отрасли Российской Федерации до 2030 года» URL: <https://legalacts.ru/doc/rasporjazhenie-pravitelstva-rf-ot-21062010-n-1039-r/> (дата обращения: 02.02.2026).
4. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года. Распоряжение Правительства РФ от 27 ноября 2021 года № 3363-р [Электронный ресурс]. URL: <https://mintrans.gov.ru/file/473193> (дата обращения: 30.01.2026).
5. Чеботарев С.С., Пугачев Н.С. Экономическая оценка создания логистического оператора на международном транспортном коридоре «Север-Юг» // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2024. Том 14. № 7А. С. 334.
6. Постановление Правительства Российской Федерации от 26.09.2016 № 969 «Об утверждении требований к функциональным свойствам технических средств обеспечения транспортной безопасности и Правил обязательной сертификации технических средств обеспечения транспортной безопасности» // URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 02.02.2026).
7. Постановление Правительства Российской Федерации от 23 декабря 2025 г. № 2107 «Об утверждении требований к функциональным свойствам технических средств обеспечения транспортной безопасности и Правил обязательной сертификации технических средств обеспечения транспортной безопасности» // URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 02.02.2026).
8. URL: https://sls-security.ru/segments/transportnaya-bezopasnost/?utm_source=yd_search&utm_medium=cpc&utm_campaign=sls-security.ru_Сегменты%20бизнеса_Поиск_РФ%21_Москва%20и%20МО_ПН-ПТ%20рабочее%20время&utm_content=5627879141-17233299136-other-1&utm_term=55380626442-обеспечение%20

- транспортной%20безопасности-none-goal_0&yclid=16056294823726415871 (дата обращения 31.01.2026).
9. Чеботарев С. С., Романова А. В. Анализ рынка труда Российской Федерации: прогноз изменений на рынке труда после завершения специальной военной операции // Региональная и отраслевая экономика. – 2024. – № 6. – С. 15. doi: 10.47576/2949-1916.2024.6.6.001.
 10. Мельникова Е.П., Черноус О.И., Везелев И.И. Оценка инфраструктурного обеспечения экономической безопасности автотранспорта регионов Российской Федерации // Вестник УрФУ. Серия экономика и управление. 2019. Т. 18, № 2. С. 313. DOI: 10.15826/vestnik.2019.18.2.016.

References

1. Forrester, S. V. Analysis of Factors and Threats to the Economic Security of Passenger Transport Enterprises / S. V. Forrester, E. N. Shuravina // Bulletin of Eurasian Science. — 2024. — Vol. 16. — No. 2. — URL: <https://esj.today/PDF/51ECVN224.pdf> DOI: 10.15862/51ECVN224 (accessed on 30.01.2026).
2. SP 42.13330.2016. Urban Planning. Planning and Development of Urban and Rural Settlements. Updated version of SNiP 2.07.01-89*: Code of Rules (approved by Order of the Ministry of Construction of the Russian Federation No. 473/pr dated June 9, 2022). Moscow, 2022, Table 4.1.
3. Order of the Government of the Russian Federation No. 1039-r dated June 21, 2010, "On Approval of the Strategy for the Development of the Geological Industry in the Russian Federation until 2030" URL: <https://legalacts.ru/doc/rasporjazhenie-pravitelstva-rf-ot-21062010-n-1039-r/> (accessed on 02.02.2026).
4. Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035. Order of the Government of the Russian Federation No. 3363-r dated November 27, 2021 [Electronic resource]. URL: <https://mintrans.gov.ru/file/473193> (accessed on January 30, 2026).
5. Chebotarev S.S., Pugachev N.S. Economic Assessment of the Creation of a Logistics Operator on the North-South International Transport Corridor // Economics: Yesterday, Today, and Tomorrow. 2024. Volume 14. No. 7A. P. 334.
6. Decree of the Government of the Russian Federation No. 969 dated September 26, 2016 "On Approval of the Requirements for the Functional Properties of Transport Security Technical Equipment and the Rules for Mandatory Certification of Transport Security Technical Equipment" // URL: <http://www.consultant.ru> (accessed on February 2, 2026).
7. Decree of the Government of the Russian Federation No. 2107 dated December 23, 2025 "On Approval of the Requirements for the Functional Properties of Transport Security Technical Equipment and the Rules for Mandatory Certification of Transport Security Technical Equipment" // URL: <http://www.consultant.ru> (accessed on February 2, 2026).
8. URL:https://sfs-security.ru/segments/transportnaya-bezopasnost/?utm_source=yd_search&utm_medium=cpc&utm_campaign=sfs-ecurity.ru_Сегменты%20бизнеса_SEARCH_RF%21Москва%20и%20МО_ПН-ПТ%20рабочее%20время&utm_content=5627879141-17233299136-other-1&utm_term=55380626442-обеспечение%20транспортной%20security-none-goal_0&yclid=16056294823726415871(accessed 31.01.2026).
9. Chebotarev S. S., Romanova A.V. Labor market analysis of the Russian Federation Russian Federation: forecast of changes in the labor market after the end of the special military operation // Regional and Sectoral Economics. – 2024. – No. 6. – P. 15. doi: 10.47576/2949-1916.2024.6.6.001.
10. Melnikova E.P., Chornous O.I., Vezeliev I.I. Assessment of the Infrastructure Support for the Economic Security of Motor Transport in the Regions of the Russian Federation // Bulletin of the Ural Federal University. Series Economics and Management. 2019. Vol. 18, No. 2. P. 313. DOI: 10.15826/vestnik.2019.18.2.016.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Чеботарев Владислав Стефанович, доктор экономических наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры экономики и менеджмента, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: vschebotarev@rambler.ru

Морозов Олег Леонидович, кандидат экономических наук, заместитель начальника по научной работе, Нижегородская академия МВД России, 603950, Бокс-268, Нижний Новгород, Анкудиновское шоссе, 3, e-mail: morozoole@yandex.ru

Дорожкин Артем Владиславович, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий и инструментальных методов в экономике института экономики, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», 603022, Нижний Новгород, пр.Гагарина, 23, e-mail: dorozhkin_av@unn.ru

Минеев Валерий Иванович, доктор экономических наук, профессор, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5. e-mail: vlrjmineev@gmail.com

Vladislav S. Chebotarev, Doctor of Economics, Professor, Chief Researcher at the Department of Economics and Management, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterova Street, Nizhny Novgorod, 603950, e-mail: vschebotarev@rambler.ru

Oleg L. Morozov, Candidate of Economic Sciences, Deputy Head for Scientific work, Nizhny Novgorod Academy of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 603950, Box-268, Nizhny Novgorod, Ankudinovskoe highway, 3, e-mail: morozoole@yandex.ru

Artyom V. Dorozhkin, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Technology and Instrumental Methods in Economics, Institute of Economics, National Research University of Nizhny Novgorod named after N.I. Lobachevsky, 603022, Nizhny Novgorod, 23 Gagarin Ave, e-mail: dorozhkin_av@unn.ru

Valery I. Mineev, Doctor of Economics, Professor, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterova Street, Nizhny Novgorod, 603950, e-mail: vlrjmineev@gmail.com

Статья поступила в редакцию 03.02.2026; принята к публикации 26.02.2026; опубликована онлайн 20.03.2026. Received 03.02.2026; published online 20.03.2026.

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

**WATER TRANSPORT OPERATION, WATERWAYS
COMMUNICATONS AND HYDROGRAPHY**

УДК 911.5 (470.314)

DOI: 10.37890/jwt.vi86.678

**Геоэкологический анализ территории водосборного бассейна
реки Кетарша на основе ландшафтного подхода**

А.Е. Астахин^{1,2}

ORCID: 0000-0003-2133-0888

О.Е. Ватина¹

ORCID: 0000-0003-1471-4103

И.С. Гусев¹

ORCID: 0009-0008-0197-9798

М.В. Никонов¹

ORCID: 0009-0001-0665-2742

¹ *Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина, г. Нижний Новгород, Россия*

² *Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, г. Княгинино, Нижегородская область, Россия*

Аннотация. В статье представлены результаты геоэкологического анализа водосборного бассейна реки Кетарша, расположенного в лесостепной зоне Нижегородской области (Бутурлинский район) на основе ландшафтного подхода. Исследование основано на материалах данных дистанционного зондирования и полевых исследований, обработанных с помощью геоинформационной системы QuantumGIS. В ходе проведения исследования применялись методы: ландшафтного анализа, дистанционного зондирования Земли, геоинформационный, экспедиционный. Для реализации принципов ландшафтного подхода для изучаемой территории была разработана ландшафтная карта, выполненная на уровне урочищ. Установлена высокая степень антропогенного воздействия на ландшафты лесостепной зоны Нижегородской области, проявляющуюся в интенсивной сельскохозяйственной освоенности (в частности, в бассейне р. Кетарша распаханность достигает 48,1%) и критическом состоянии гидрографической сети, включая потерю рекой Кетарша постоянного стока к 2025 году. С применением методики адаптивной оценки и управления окружающей средой (АЕАМ) проведена оценка воздействия на отдельные компоненты ландшафта (литогенную основу, рельеф, гидросеть, почвенный и растительный покров и др.), что позволило выделить наиболее уязвимые и стабильные ландшафтные комплексы на уровне урочищ. Установлена значительная пространственная неоднородность устойчивости ландшафтов к антропогенным нагрузкам, имеющая выраженное тяготение к границам урочищ.

Ключевые слова: геоэкологическая оценка, антропогенное воздействие, малые реки, лесостепная зона, рациональное природопользование, водосборный бассейн, структура землепользования.

Geocological analysis of the Ketarsha river catchment basin based on a landscape approach

Andrej E. Astashin^{1,2}

ORCID: 0000-0003-2133-0888

Ol'ga E. Vatina¹

ORCID: 0000-0003-1471-4103

Ivan S. Gusev¹

ORCID: 0009-0008-0197-9798

Matvey V. Nikonov¹

ORCID: 0009-0001-0665-2742

¹*Kozma Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University (Minin University), Nizhny Novgorod, Russia*

²*Nizhny Novgorod state engineering and economic university, Knyaginino, Russia*

Abstract. The article presents the results of a geocological analysis of the catchment area of the Ketarsha River, located in the forest-steppe zone of the Nizhny Novgorod region (Buturlinsky district), based on a landscape approach. The research is based on remote sensing and field research data, processed using the QuantumGIS geoinformation system. During the research, the following methods were used: landscape analysis, remote sensing of the Earth, geoinformation, and expeditionary. To implement the principles of the landscape approach for the researched territory, a landscape map was developed at the level of the tracts. A high degree of anthropogenic impact on the landscapes of the forest-steppe zone of the Nizhny Novgorod region has been established, manifested in intensive agricultural development (in particular, in the basin of the Ketarsha River, tillage reaches 48.1%) and the critical condition of the hydrographic network, including the loss of permanent runoff by the Ketarsha River by 2025. Using the adaptive assessment and environmental management (AEAM) methodology, an assessment of the impact on individual landscape components (lithogenic base, relief, hydro grid, soil and vegetation cover, etc.) was carried out, which made it possible to identify the most vulnerable and stable landscape complexes at the tract level. A significant spatial heterogeneity in the stability of landscapes to anthropogenic loads has been established, which has a pronounced attraction to the boundaries of tracts.

Keywords: geo-ecological assessment, anthropogenic impact, small rivers, forest-steppe zone, rational nature management, drainage basin, and land use structure.

Введение

В условиях существующей социально-экономической формации, где основной задачей землепользователей является извлечение экономической выгоды из территории, вопросы рационального природопользования и устойчивого развития не поднимаются в должной мере. Водосборный бассейн реки Кетарша, расположенный в лесостепной зоне Нижегородской области в Бутурлинском районе, относится к зонам интенсивного сельскохозяйственного освоения. В связи с этим обнаруживается острая необходимость в проведении геоэкологической оценки антропогенного воздействия на компоненты ландшафта, которая в перспективе позволит выявить степень влияния активного землепользования и разработать меры по восстановлению и сохранению исследуемой территории.

Территория водосборного бассейна реки Кетарша испытывает значительное антропогенное давление, проявляющееся в интенсивной распашке земель (средняя распаханность составляет 48,1%) и сокращении лесных массивов, что привело к критической ситуации: по состоянию на 2025 год река Кетарша в период летней межени теряет постоянный сток и переходит в категорию временных водотоков.

Проблему неравномерного годового стока реки придаёт высокая закарстованность территории бассейна, которая может ускорить деградацию речной сети.

Таким образом, отсутствие геоэкологической оценки водосборного бассейна реки Кетарша является существенной проблемой, препятствующей разработке эффективных мер по сохранению и восстановлению малых рек лесостепной зоны Нижегородской области.

Материалы и методы

Цель – произвести геоэкологическую оценку территории водосборного бассейна реки Кетарша.

Объект исследования – территория водосборного бассейна реки Кетарша.

Предмет исследования – геоэкологический анализ территории.

Задачи исследования:

Проанализировать теоретическую литературу по проблеме исследования;

Изучить ландшафтную структуру территории водосборного бассейна реки Кетарша и структуру землепользования;

Выполнить геоэкологический анализ исследуемой территории на основе ландшафтного подхода.

Методы исследования: описательный, картографический, ГИС-анализ, анализ литературы, экспедиционный, дистанционных исследований, ландшафтного анализа, географического районирования.

Результаты

Водосборный бассейн реки Кетарша расположен на севере Приволжской возвышенности в юго-восточной части Нижегородской области в северной части возвышенности Межпьянье. Большая часть исследуемой территории лежит в пределах Бутурлинского муниципального округа, остальная – в пределах Перевозского округа. Площадь водосборного бассейна составляет 187 км².

Дочетвертичные образования в пределах изучаемой территории представлены отложениями преимущественно пермской системы (глины, алевролиты, аргиллиты, мергели, пески, гипсы, известняки). На западной, южной и восточной периферии водосборного бассейна распространены отложения юрской системы (глины, пески, мергели, глины карбонатные, глинистые сланцы), на юге локально встречаются отложения меловой системы (глины, песчаные глины, пески) [1].

На большей части исследуемой территории четвертичные образования представлены средне-верхнечетвертичными и современными отложениями комплекса объединенных отложений перигляциальных зон днепровского, московского и калининского оледенений, элювиально-делювиальных образований водоразделов, делювиально-солифлюкционных образований склонов и аллювиально-делювиальных выходов древних балок. В пределах пойм рек обнаруживаются современные аллювиальные отложения [2].

Карстовая напряженность территории составляет 0,125 карстовой единицы на км², при этом наиболее активно карстовые процессы протекают на склонах речной долины и на пойме [3].

Территория водосборного бассейна реки Кетарша имеет холмисто-увалистый рельеф, сильно расчленённый овражно-балочной сетью, что характерно для северных отрогов Приволжской возвышенности; кроме того, характерно широкое распространение карстовых форм рельефа. Амплитуда высот в пределах водосборного бассейна составляет 141 м.

Исследуемая территория лежит в области умеренно-континентального климата.

По данным сервисов мониторинга качества воздуха, на ноябрь 2025 года в Бутурлино индекс качества воздуха составляет 24 [4], что соответствует категории «хорошее». Бутурлинский район, в пределах которого лежит основная часть водосборного бассейна реки Кетарша, не входит в число территорий, где проводится

регулярный стационарный мониторинг загрязнения атмосферного воздуха, что затрудняет получение официальных данных по ПДК конкретных веществ.

Гидрографическая сеть водосборного бассейна реки Кетарша включает реки, пруды, родники и небольшие участки болот в пределах пойм. Суммарная протяжённость русловой сети составляет 119,58 км. Река Кетарша ныне представляет собой временный водоток, в 2025 году в период весеннего половодья сток сохранился лишь в верхнем течении, в период летний межени сток отсутствовал на всём протяжении реки. Озёрная сеть представлена карстовыми озёрами, дисперсно распространёнными по всей территории водосборного бассейна, и озёрами-старицами. Болота встречаются редко и образованы в результате зарастания озёр-стариц. Широкое развитие карстовых процессов на изучаемой территории оказывает существенное влияние на поверхностный сток: в период весеннего половодья 2025 года авторами была обнаружена область карстового перехвата [5] в верхнем течении реки Кетарша.

Почвенный покров водосборного бассейна реки Кетарша представлен серыми лесными почвами и чернозёмами, почвами овражно-балочного комплекса и аллювиально-дерновыми почвами на поймах рек.

Растительный покров сильно трансформирован человеком: в его структуре доминируют культурценозы полей, а лесные массивы сохранились локально в пределах периферийных водоразделов и представлены дубравами и осинниками. Вдоль русел рек распространены пойменные растительные сообщества. Лесистость территории составляет 13,7% [6].

В системе физико-географического районирования территория водосборного бассейна реки Кетарша полностью лежит в пределах лесостепной зоны, Приволжской ландшафтной провинции, в Центральном остепнённом районе (по Ф.М. Баканиной). В ландшафтной структуре доминируют агроландшафты [7]. Опираясь на данные полевых исследований и фондовых данных, была установлена ландшафтная структура исследуемой территории на уровне урочищ (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1

Ландшафтная структура водосборного бассейна реки Кетарша на уровне урочищ

Зона Лесостепная
Провинция Приволжская
Район Центральный остепнённый
Урочище: 1. Пойма сухого ручья под ивняком рудерально-травным на аллювиально-дерновых почвах 2. Плосковолнистая пойма средней реки под лугом безостокострецовым на аллювиально-дерновых почвах 3. Придолинный склон малой реки под культурценозами полей и лугами на серых лесных почвах 4. Приводораздельный склон под восстановлением луга наземновейникового с дисперсным восстановлением березы повислой на серых-лесных почвах 5. Плакор под культурценозами полей и лугами на серых лесных почвах 6. Плакор под дубняком липняковым волосистоосоковым на серых-лесных почвах 7. Плакор под восстановлением луга лещинового волосистого в осиннике на серых лесных почвах

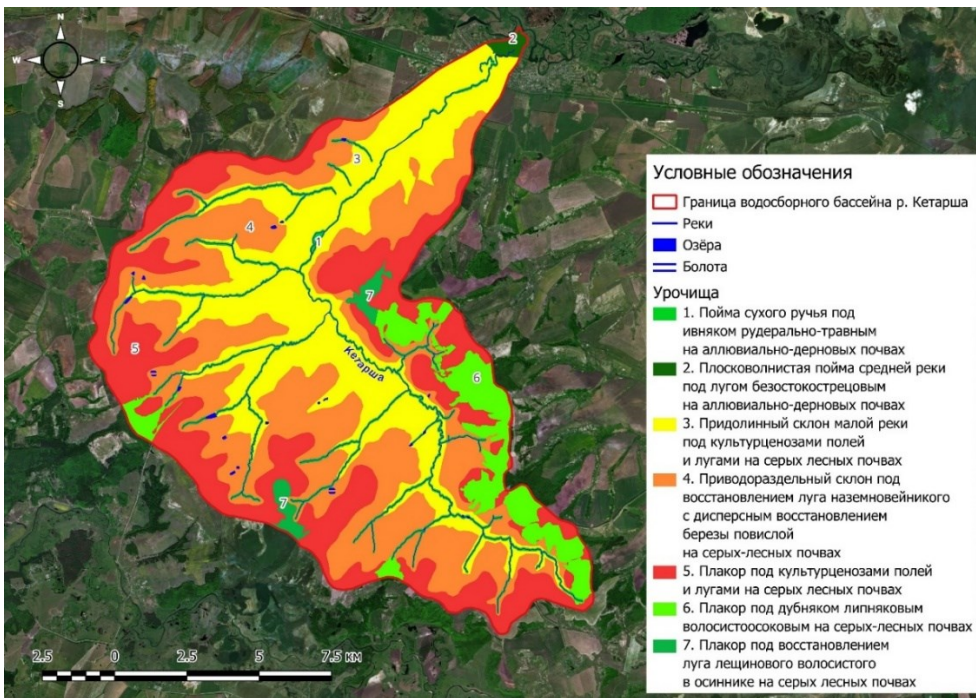


Рис. 1. Ландшафтная дифференциация территории водосборного бассейна реки Кетарша на уровне урочищ

Далее была исследована структура землепользования изучаемой территории (рис. 2).

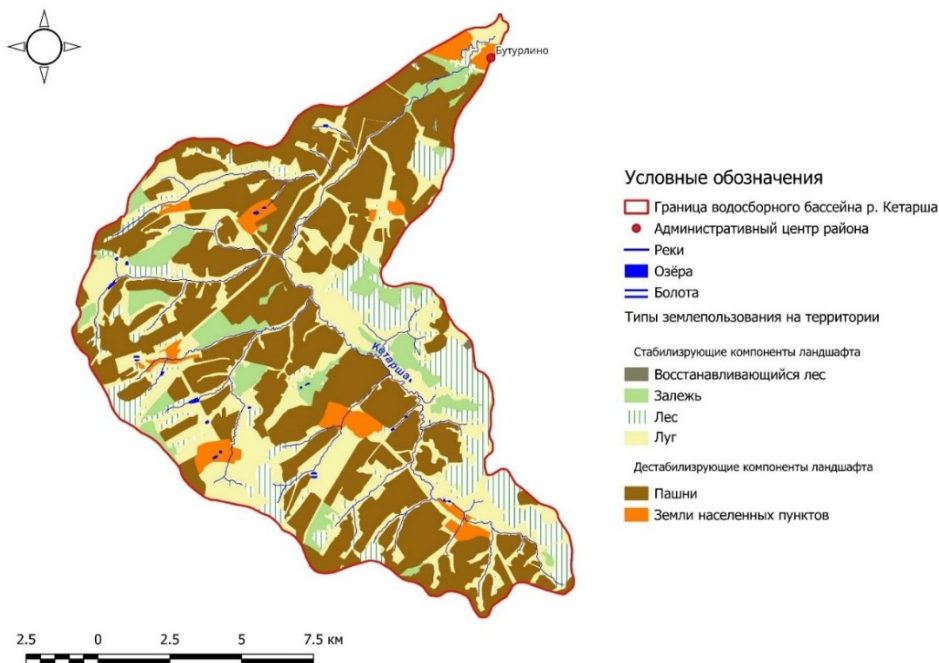


Рис. 2. Типы землепользования территории водосборного бассейна реки Кетарша

Основным типом землепользования на территории водосборного бассейна являются пашни. С помощью инструментов геоинформационного анализа среди них были выделены стабилизирующие компоненты ландшафта и дестабилизирующие и рассчитаны их площадные и процентные значения. (табл. 2, 3).

Таблица 2

Площадные показатели основных компонентов ландшафта территории водосборного бассейна реки Кетарша

№ урочища	Площадь урочища, км ²	Площадь стабилизирующих компонентов ландшафтов, км ²				Площадь дестабилизирующих компонентов ландшафтов, км ²	
		Леса	Восстанавливающиеся леса	Луга	Залежи	Пашни	Земли населённых пунктов
1	10	1,38	-	7,29	0,36	0,64	0,39
2	0,78	0,04	-	0,74	-	-	0,004
3	50,38	1,61	0,02	10,34	3,45	32,28	2,69
4	64,77	4,97	0,01	19,09	4,26	32,46	3,98
5	47,78	2,72	0,1	13,29	5,9	25,41	0,35
6	13,92	13,92	-	-	-	-	-
7	2,19	2,19	-	-	-	-	-

Таблица 3

Площадные показатели стабилизирующих и дестабилизирующих компонентов урочищ водосборного бассейна реки Кетарша

№ урочища	Площадь стабилизирующих компонентов ландшафтов, %				Площадь дестабилизирующих компонентов ландшафтов, %		Итого стабилизирующих, %	Итого дестабилизирующих, %
	Леса	Восстанавливающиеся леса	Луга	Залежи	Пашни	Земли населённых пунктов		
1	13,8	-	72,9	3,6	6,4	3,9	90,3	10,3
2	5,13	-	94,87	-	-	0,51	100	0,51
3	3,2	0,04	20,52	6,85	64,07	5,34	30,61	69,41
4	7,67	0,02	29,47	6,58	50,12	6,14	43,74	56,26
5	5,69	0,21	27,81	12,35	53,18	0,73	46,06	53,91
6	100	-	-	-	-	-	100	-
7	100	-	-	-	-	-	100	-

Полученные данные показывают, что значительные площади некоторых территорий (например, урочища склонов) водосборного бассейна занимают дестабилизирующие компоненты, а территории некоторых урочищ (плакор под дубняком липняковым волосистоосоковым на серых лесных почвах и плакор под восстановлением луга лещинового волосистого в осиннике на серых лесных почвах)

дестабилизирующих компонентов лишены вовсе. Это отражает выраженную пространственную неравномерность антропогенного воздействия на исследуемую территорию.

На основе полученных результатов была произведена оценка антропогенного воздействия на составляющие компоненты ландшафта по методике «адаптивной оценки и управления» (Adaptive Environmental Assessment and Management – AEAM), предложенной К. Холлингом [8, 9]. Были оценены следующие объекты воздействия:

- Литогенная основа;
- Рельеф;
- Атмосферный воздух;
- Гидрографическая сеть;
- Почвенный покров;
- Растительный покров;
- Фаунистический комплекс.

Оценка каждого выделенного урочища производилась по критериям длительности, масштаба антропогенного воздействия и степени нарушения объекта. В табл. 4 приведён пример выполнения оценки одного из урочищ.

На основе анализа пространственных данных о структуре и характере землепользования в границах урочищ был рассчитан интегральный показатель антропогенного воздействия на каждое урочище (рис. 3).

Таблица 4

Оценка антропогенного воздействия на территорию поймы сухого ручья под ивняком рудерально-травным на аллювиально-дерновых почвах

Объект воздействия	Масштаб нарушения	Длительность нарушения	Степень нарушения	Заключение
Литогенная основа	Локальное	Долговременное	Умеренная	Существенное
Рельеф	Локальное	Долговременное	Умеренная	Существенное
Атмосферный воздух	Локальное	Долговременное	Незначительная	Несущественное
Гидрографическая сеть	Локальное	Долговременное	Умеренная	Существенное
Почвенный покров	Локальное	Долговременное	Умеренная	Существенное
Растительный покров	Локальное	Долговременное	Умеренная	Существенное
Фаунистический комплекс	Локальное	Долговременное	Умеренная	Существенное

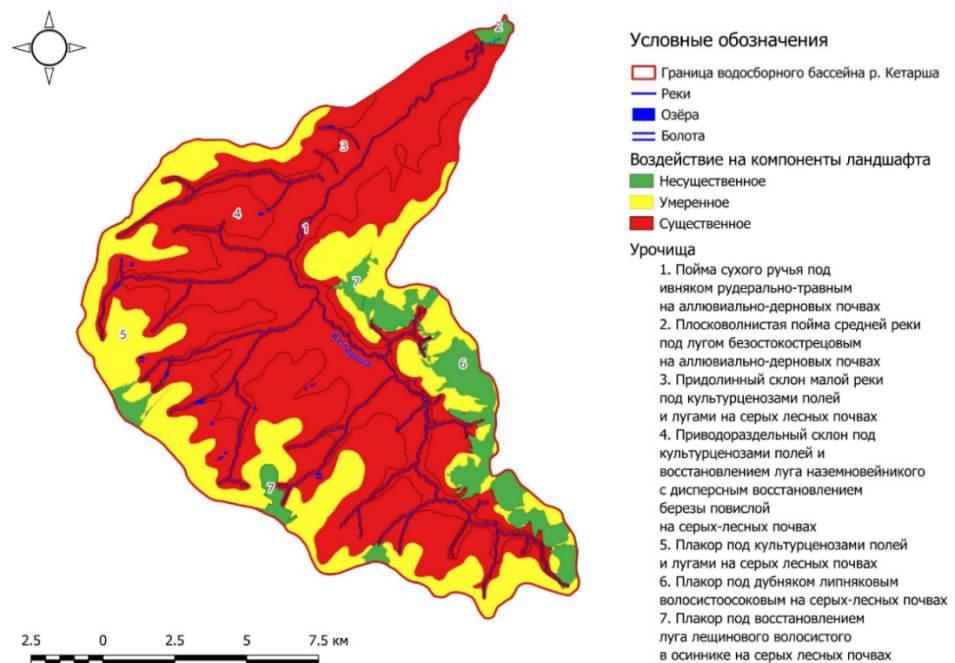


Рис. 3. Геоэкологическая оценка естественной защищённости территории водосборного бассейна реки Кетарша

Обсуждение

Проведённое исследование территории водосборного бассейна реки Кетарша выявило выраженную зависимость степени влияния антропогенной нагрузки на территорию от ландшафтной структуры территории. Пространственный анализ типов землепользования позволил установить высокую степень распаханности территории (41,8%) при выраженной неравномерности этого показателя между разными урочищами.

Наибольшей устойчивостью характеризуются урочища: плакор под дубняком липняковым волосистоосоковым и плакор под восстановлением луга лещинового в осиннике, где доля стабилизирующих компонентов достигает 100%. В то же время придолинный склон малой реки и приводораздельный склон характеризуются преобладанием дестабилизирующих компонентов, что указывает на высокую степень нарушения природных комплексов. Плакор под культурценозами несмотря на высокую долю дестабилизирующих компонентов ландшафта показал умеренную степень воздействия по результатам интегральной оценки.

Заключение

Результаты проведенного исследования водосборного бассейна реки Кетарша позволяют утверждать, что территория находится в состоянии экологического кризиса, обусловленного интенсивной сельскохозяйственной эксплуатацией. Ландшафтная структура бассейна характеризуется доминированием агроландшафтов при крайне низкой лесистости.

Выявлена выраженная детерминированность состояния ландшафтов их морфолитогенными и почвенными особенностями: на водоразделах сохранились относительно устойчивые лесные массивы, тогда как склоновые и долинны комплексы подверглись максимальной антропогенной трансформации.

Критическое состояние гидрологического режима, проявляющееся в исчезновении постоянного стока реки Кетарша в летний период, требует немедленного принятия мер по сохранению и восстановлению водосборного бассейна. Особое внимание следует уделить карстово-опасным территориям, где интенсивная распашка ускоряет процессы деградации рельефа и поверхностного стока [10, 11].

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. Карта дочетвертичных образований: лист N-38-III: масштаб 1:200 000: Государственная геологическая карта Российской Федерации. Первое изд. Геологическая карта дочетвертичных образований / сост. А. М. Белоозерова; ред. В. И. Игнатьев. – М.: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 1958. – Электрон. ресурс. – Режим доступа: https://www.geolkarta.ru/list_200.php?idlist=N-38-III&idlist_d=G&gen=1&g=1 (дата обращения: 08.10.2023).
2. Карта четвертичных образований: листы O-38-III, O-38-IV: масштаб 1:200 000 / фондовые данные АО «Волгагеология».
3. Коршунов М.Ю. Географическое краеведение. Бутурлинский район: учеб. пособие. Н. Новгород, 2008. 79 с.
4. Яндекс.Погода. Уровень загрязнения воздуха — Бутурлино, городское поселение. – Доступно по: <https://yandex.ru/pogoda/ru/buturlino-urban-settlement/pollution> (дата обращения: 22.11.2025).
5. Терминология карста: материалы по геоморфологической терминологии / Д. А. Тимофеева, В. Н. Дублянский, Т. З. Кикнадзе; отв. ред. С. С. Коржув; АН СССР, Геоморфол. комис., Ин-т географии. М.: Наука, 1991. 258 с.
6. Astashin A., Badin M., Vatina O., Podkovyrina V., Ogurtcov A. Qualitative and quantitative parameters of the dynamics of the steering network of elementary watercourses in the northern forest-steppe in the XXI century (on the example of the catchment basin of the Ketarsha river, Privolzhskaya upland, Russia) // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 463. Pp. 02031. DOI: 10.1051/e3sconf/202346302031.
7. Astashin A. E., Badin M. M., Vatina O. E., Sevastyanova M. Y., Belova A. D. Landscape differentiation of the territory of the Buturlinsky district of the Nizhny Novgorod region (Russia) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2023. Vol. 1154. Pp. 012045. DOI: 10.1088/1755-1315/1154/1/012045.
8. Holling C. S. Resilience of ecosystems; local surprise and global change // Sustainable development of the biosphere / ed. by W. C. Clark, R. E. Munn. – Cambridge (UK): Cambridge University Press, 1986. P. 292–317.
9. Holling C. S. (ed.). Adaptive environmental assessment and management. Chichester; New York: Wiley, 1978. XVIII, 377 p.
10. Водогрецкий В. Е. Антропогенное изменение стока малых рек.Л.: Гидрометеиздат, 1990.210 с.
11. Сивохиц Ж. Т. Анализ факторов трансформации водосборов малых рек степной зоны. // Сб. трудов конференции Института степи УрО РАН. Оренбург. – 2015. – С. 760–763. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23922302> (дата обращения: 22.11.2025).

References

1. Karta dochetvertichnyh obrazovaniy [Geological map of pre-quatery formations] (Sheet N-38-III) scale 1:200 000 Retrieved from: URL: https://www.geolkarta.ru/list_200.php?idlist=N-38-III&idlist_d=G&gen=1&g=1 (дата обращения: 08.10.2023).
2. Karta chetvertichnyh obrazovaniy [Geological map of quaternary formations] (Sheet O-38-III, O-38-IV) scale 1:200 000 Available at: https://www.geolkarta.ru/list_200.php?idlist=N-38-III&idlist_d=G&gen=1&g=1 (accessed 08.10.2023).
3. Korshunov M.YU. Geograficheskoe kraevedenie. Buturlinskij rajon [Geographical local history. Buturlinsky district]. N. Novgorod, 2008. 79 p.
4. Yandex.Pogoda. Uroven' zagryazneniya vozduha — Buturlino, gorodskoe poselenie [Yandex.Weather. Air pollution level — Buturlino, urban settlement]. Available at: <https://yandex.ru/pogoda/ru/buturlino-urban-settlement/pollution> (accessed 22.11.2025).
5. Terminologiya karsta: materialy po geomorfologicheskoy terminologii [Karst terminology: materials on geomorphological terminology] / Doctor of Sciences Timofeeva, V. N. N. Dublyansky, T. N. Z.

- Kiknadze; editor-in-chief N. According to S. N. According to S. N. Korzhuev; USSR Academy of Sciences, Geomorphol. comis., Institute of Geography. Moscow: Nauka, 1991. 258 p.
6. Astashin A., Badin M., Vatina O., Podkovyrina V., Ogurtov A. Qualitative and quantitative parameters of the dynamics of the steering network of elementary watercourses in the northern forest-steppe in the XXI century (on the example of the catchment basin of the Ketarsha river, Privolzhskaya upland, Russia) // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 463. Pp. 02031. DOI: 10.1051/e3sconf/202346302031.
 7. Astashin A. E., Badin M. M., Vatina O. E., Sevastyanova M. Y., Belova A. D. Landscape differentiation of the territory of the Buturlinsky district of the Nizhny Novgorod region (Russia) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2023. Vol. 1154. Pp. 012045. DOI: 10.1088/1755-1315/1154/1/012045.
 8. Holling C. S. Resilience of ecosystems; local surprise and global change // Sustainable development of the biosphere / ed. by W. C. Clark, R. E. Munn. – Cambridge (UK): Cambridge University Press, 1986. P. 292–317.
 9. Holling C. S. (ed.). Adaptive environmental assessment and management. Chichester; New York: Wiley, 1978. XVIII, 377 p.
 10. Vodogreckij V. E. Antropogennoe izmenenie stoka malyh rek [Anthropogenic change in the flow of small rivers]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990. 210 p.
 11. Sivohip ZH. T. Analiz faktorov transformacii vodosborov malyh rek stepnoj zony [Analysis of the factors of transformation of small river catchments in the steppe zone] // Sb. trudov konferencii Instituta stepi UrO RAN [Proceedings of the conference of the Institute of Steppe, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences]. Orenburg. 2015, pp. 760-763. Available at: URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23922302> (accessed 22.11.2025).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Асташин Андрей Евгеньевич, к.г.н., доцент кафедры географии, географического и геоэкологического образования, Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина, 603005, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 1; доцент кафедры сервиса, Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, 606340, г. Княгинино, ул. Октябрьская, д. 22А, e-mail: astashinfizgeo@yandex.ru

Ватина Ольга Евгеньевна, аспирант, Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина, 603005, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 1, e-mail: vatinaol@yandex.ru

Гусев Иван Сергеевич, бакалавр, Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина, 603005, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 1, e-mail: ivanguzevteatral@yandex.ru

Никонов Матвей Владимирович, бакалавр, Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина, 603005, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 1, e-mail: nmatvej724@gmail.com

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; Associate Professor of the Department of Service, Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University, Knyaginino, Oktyabrskaya St., 22A, 606340

Olga E. Vatina, Graduate Student, Kozma Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University (Minin University), 1, Ulyanov st, Nizhny Novgorod, 603005

Ivan S. Gusev, Bachelor's Student, Kozma Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University (Minin University), 1, Ulyanov st, Nizhny Novgorod, 603005

Matvey V. Nikonov, Bachelor's Student, Kozma Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University (Minin University), 1, Ulyanov st, Nizhny Novgorod, 603005

Статья поступила в редакцию 27.01.2026; принята к публикации 19.02.2026; опубликована онлайн 20.03.2026. Received 27.01.2026; published online 20.03.2026.

УДК 556, 614.87

DOI: 10.37890/jwt.vi86.671

Стратегические направления развития гидрологического прогнозирования для обеспечения безопасности и эффективности судоходства в России до 2035 года

Н.А. Волкова^{1,2}

ORCID: 0000-0002-9272-4713

¹ ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет», г. Санкт-Петербург, Россия

² ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Надёжное гидрологическое прогнозирование является критически важным элементом для обеспечения безопасности мореплавания и эффективности работы водного транспорта в условиях роста частоты и интенсивности опасных гидрологических явлений. В статье проведён анализ текущего состояния системы гидрологического прогнозирования Росгидромета с точки зрения задач судоходства. Выявлены ключевые проблемы, ограничивающие её потенциал: технологическое отставание, дефицит данных в реальном времени, недостаточная детализация прогнозов для акваторий портов и внутренних водных путей. На основе системного подхода сформулированы стратегические направления развития до 2035 года, включая цифровизацию, внедрение ансамблевых и вероятностных методов, развитие наблюдательной сети и специализированных сервисов для транспортной отрасли. Предложены целевые показатели, такие как повышение оправдываемости штормовых предупреждений и прогнозов ледовой обстановки до 98%, а также создание интегрированных систем поддержки принятия решений для капитанов и лоцманов. Реализация стратегии позволит существенно повысить уровень безопасности судоходства, оптимизировать логистику и минимизировать экономические риски для морского и речного транспорта.

Ключевые слова: гидрологическое прогнозирование, безопасность судоходства, водный транспорт, стратегия развития, ансамблевые прогнозы, Росгидромет, опасные гидрологические явления.

Strategic development trends in hydrological forecasting to ensure navigation safety and efficiency in Russia until 2035

Nadezhda A. Volkova^{1,2}

ORCID: 0000-0002-9272-4713

¹Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

²Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

Abstract. Reliable hydrological forecasting is critical for ensuring the safety of navigation and the efficiency of water transport in conditions of increasing frequency and intensity of hazardous hydrological phenomena. This article analyzes the current state of the Roshydromet hydrological forecasting system from the perspective of shipping objectives. Key challenges limiting its potential were identified: technological lag, a lack of real-time data, and insufficient forecast detail for port waters and inland waterways. Based on the system approach, strategic development trends until 2035 were formulated, including digitalization, the implementation of ensemble and probabilistic methods, the development of an observation network, and specialized services for the transport industry. Target indicators were proposed, such as increasing the accuracy of storm warnings and ice forecasts to 98%.

as well as the creation of integrated decision support systems for captains and pilots. The strategy implementation will significantly improve navigation safety, optimize logistics, and minimize economic risks for maritime and river transport.

Keywords: hydrological forecasting, navigation safety, water transport, development strategy, ensemble forecasts, Roshydromet, hazardous hydrological phenomena.

Введение

Ускоряющиеся климатические изменения приводят к росту частоты, интенсивности и масштабов опасных гидрологических явлений (ОЯ), таких как штормовые нагоны, опасные волнения, аномальные сгонно-нагонные явления, экстремальные ледовые условия, а также паводки и сели, разрушающие береговую инфраструктуру. Для водного транспорта эти явления создают прямую угрозу безопасности мореплавания, приводят к простоям флота, повреждениям портовых сооружений, срывам графиков грузоперевозок и, как следствие, к значительным экономическим потерям. В условиях возрастающей климатической нестабильности обеспечение надежного и заблаговременного гидрологического прогнозирования перестает быть чисто метеорологической задачей и становится критически важным элементом стратегического управления транспортной логистикой и обеспечения эксплуатационной надежности всей отрасли.

Современная система гидрологического прогнозирования Росгидромета, являющаяся основным источником информации для капитанов, лоцманов и судовладельцев, сталкивается с рядом системных вызовов. К ним относятся технологическое отставание, недостаточная плотность наблюдательной сети в ключевых для судоходства районах, дефицит специализированных прогностических продуктов для акваторий портов и фарватеров, а также слабая интеграция с цифровыми системами управления транспортными потоками. [1-15]

Целью статьи является разработка стратегических направлений развития системы гидрологического прогнозирования в Российской Федерации на период до 2035 года, ориентированных на повышение уровня безопасности и эффективности работы водного транспорта. Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- провести комплексный анализ текущего состояния системы гидрологического прогнозирования Росгидромета и выявить ключевые проблемы, наиболее остро влияющие на обеспечение нужд морского и речного судоходства;
- сформулировать приоритетные направления развития, включая модернизацию наблюдательной сети в портах и на внутренних водных путях, внедрение цифровых двойников акваторий, развитие ансамблевого и вероятностного прогнозирования волнения, ледовой обстановки и уровней воды, а также интеграцию искусственного интеллекта для создания специализированных сервисов;
- определить целевые показатели эффективности системы, такие как повышение заблаговременности и точности прогнозов для судоходства, увеличение оправдываемости штормовых предупреждений для акваторий, и оценить ожидаемый социально-экономический эффект от их реализации для воднотранспортного комплекса.

Объектом исследования выступает система гидрологического прогнозирования Росгидромета в контексте ее взаимодействия с задачами водного транспорта. В работе использованы методы системного анализа научных публикаций и нормативно-технической документации, регламентирующей гидрометеорологическое обеспечение судоходства, изучение отчетных материалов Росгидромета и профильных транспортных ведомств, а также методы экспертной оценки, основанные на мнениях специалистов в области гидрологии и морской инженерии.

1. Современное состояние и диагностика проблем

1.1. Достижения последнего десятилетия (2014-2024 гг.)

За последние десять лет в Российской Федерации достигнут существенный прогресс в развитии системы гидрологического прогнозирования. Одним из ключевых достижений стало развертывание специализированных геоинформационных систем (ГИС), таких как «АМУР», «ВОЛГА» и общенациональная платформа «Гидрология». Эти системы позволили интегрировать пространственные данные о гидрологическом режиме, автоматизировать формирование прогнозов и повысить оперативность принятия управленческих решений на региональном и федеральном уровнях. [1]

Научно-методическая база прогнозирования была укреплена за счёт внедрения современных гидрологических и гидродинамических моделей, включая отечественные разработки – ПЛАВ (прогноз уровня воды), ECOMAG (модель формирования стока на основе физико-статистических принципов), а также адаптацию мезомасштабной метеорологической модели ICON-RU для нужд гидрологического прогнозирования. Это способствовало повышению пространственной детализации и физической обоснованности прогнозов, особенно в условиях сложного рельефа и неоднородного снежного покрова.

Важным шагом в обеспечении автономности и оперативности мониторинга стало развитие отечественной спутниковой группировки. Запуск аппаратов «Арктика-М» и «Электро-Л» обеспечил регулярное получение данных о состоянии ледового покрова, снежном запасе, температуре поверхности и других критически важных параметрах, особенно в труднодоступных арктических и дальневосточных регионах.

В совокупности эти меры привели к заметному росту качества прогнозной деятельности: по данным Росгидромета, оправдываемость предупреждений об опасных гидрологических явлениях (ОЯ) выросла с 91,6 % в 2013 году до 96,4 % в 2023 году [1], что свидетельствует о повышении надёжности и доверия к прогнозной информации со стороны органов власти и населения.

1.2. Ключевые системные проблемы

Несмотря на достигнутые успехи, система гидрологического прогнозирования в России сталкивается с рядом глубоких системных ограничений (рис. 1), которые снижают её адаптивность к новым климатическим и социально-экономическим вызовам.



Рис. 1. Структура системных проблем в современной системе гидрологического прогнозирования РФ (рисунок автора)

Системные проблемы можно объединить в следующие группы:

1) Прогностические ограничения. Преобладание детерминированных подходов к прогнозированию не позволяет адекватно учитывать неопределённость метеорологических входных данных и внутреннюю изменчивость гидрологических процессов. Доля вероятностных и ансамблевых прогнозов в оперативной практике не превышает 10 % [1], а заблаговременность долгосрочных (сезонных и межсезонных) прогнозов остаётся недостаточной для эффективного планирования в водном хозяйстве и энергетике.

2) Проблемы с данными и мониторингом. Несмотря на развитие отечественной спутниковой группировки, значительная часть входных данных по-прежнему поступает из зарубежных источников (например, данные Copernicus, NOAA), что создаёт риски технологической зависимости. Кроме того, наблюдательная сеть характеризуется низкой плотностью и недостаточной автоматизацией: менее 30 % гидропостов передают данные в режиме, близком к реальному времени [1]. Особенно остро ощущается дефицит информации о русловых деформациях, что критично при прогнозировании паводков в динамически изменяющихся речных системах.

3) Технологическая фрагментация. Автоматизация процессов прогнозирования носит фрагментарный характер: многие этапы (подготовка исходных данных, калибровка моделей, интерпретация результатов) всё ещё требуют ручного вмешательства. Высокая рабочая нагрузка на прогнозистов – в среднем более 200 прогнозов на одного специалиста в год – приводит к усталости, снижению качества анализа и росту риска ошибок.

4) Инфраструктурная разобщённость. Отсутствует глубокая интеграция между метеорологическими и гидрологическими моделями: зачастую гидрологические прогнозы строятся на основе упрощённых метеорологических сценариев, что снижает их точность. Кроме того, слабо развиты методики прогнозирования для устьевых зон рек и арктических территорий, где взаимодействие речного стока, ледовых условий и уровня моря требует комплексного моделирования.

5) Кадровый дефицит. Система сталкивается с острым недостатком молодых специалистов, обладающих компетенциями в области гидрологии, численного моделирования и анализа больших данных. Существующие программы повышения квалификации не всегда соответствуют темпам технологических изменений, что затрудняет внедрение инновационных решений в оперативную практику.

Несмотря на значительные достижения последнего десятилетия, для обеспечения устойчивого развития гидрологического прогнозирования в условиях климатической нестабильности требуется системная трансформация как технологической, так и организационной основы отрасли.

2. Стратегические направления развития до 2035 года

Стратегические направления развития гидрологического прогнозирования в России можно свести к шести пунктам (рис. 2).

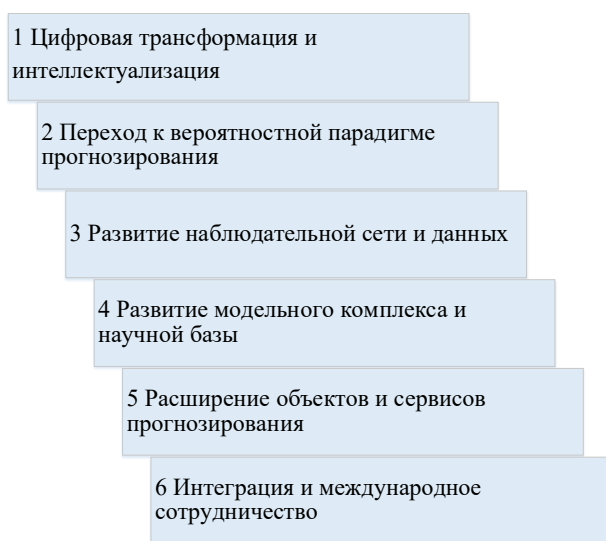


Рис. 2. Стратегические направления развития гидрологического прогнозирования (рисунок автора)

2.1. Направление: «Цифровая трансформация и интеллектуализация»

В условиях нарастающей сложности гидрологических процессов и роста требований к оперативности и точности прогнозов ключевым стратегическим вектором развития системы гидрологического прогнозирования в Российской Федерации до 2035 года выступает цифровая трансформация, сопровождаемая интеллектуализацией всех этапов прогнозного цикла. Данное направление предполагает переход от частично автоматизированных, экспертно-ориентированных процедур к полностью интегрированной, самообучающейся и адаптивной цифровой экосистеме, способной обеспечивать высокоточные прогнозы в реальном времени.

2.1.1. Полная автоматизация выпуска краткосрочных прогнозов на основе ГИС-платформ

Планируется завершение перехода к полностью автоматизированному формированию краткосрочных (до 72 часов) гидрологических прогнозов на базе унифицированных геоинформационных платформ (включая модернизированные версии систем «АМУР», «ВОЛГА» и общенациональной платформы «Гидрология»). Автоматизация будет охватывать все этапы – от сбора и предварительной обработки метеорологических и гидрологических данных до генерации и верификации прогнозных продуктов. Это позволит снизить субъективную составляющую, минимизировать временные задержки и высвободить экспертный ресурс прогнозистов для решения задач более высокого уровня сложности, включая верификацию экстремальных сценариев и взаимодействие с пользователями прогнозной информации.

2.1.2. Широкое внедрение технологий искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МО)

Технологии ИИ и МО станут неотъемлемой частью прогнозной инфраструктуры и будут применяться по трём ключевым направлениям:

– пост-обработка и коррекция прогнозов. Использование нейросетевых и ансамблевых методов для статистической коррекции систематических ошибок гидрологических моделей на основе исторических данных и текущих наблюдений;

– усвоение гетерогенных данных. Разработка и внедрение гибридных алгоритмов усвоения данных, интегрирующих информацию из разнородных источников – от спутниковых снимков («Арктика-М», «Электро-Л», международные миссии) и метеорадаров до распределённых IoT-датчиков в речных бассейнах;

– прогнозирование краткосрочных явлений. Создание специализированных ИИ-моделей для прогнозирования опасных гидрологических явлений с заблаговременностью от 0 до 12 часов на основе анализа динамики осадков, уровня воды и других параметров в режиме реального времени. Подобные системы востребованы в условиях внезапных ливневых паводков и селевых потоков.

2.1.3. Создание Единой цифровой платформы гидрологических данных и прогнозов

Для обеспечения целостности, доступности и совместимости информации планируется разработка и внедрение Единой цифровой платформы гидрологических данных и прогнозов (ЕЦПГДП) [1]. Платформа будет функционировать как централизованный хаб, объединяющий архивные и оперативные данные наблюдений, выходы численных моделей, вероятностные прогнозы и верификационные метрики. Архитектура платформы предусматривает открытый API для интеграции с системами гражданской защиты, водного хозяйства, энергетики и транспорта, а также поддержку стандартов FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable). ЕЦПГДП станет основой для цифровых двойников водных объектов и обеспечит прозрачность, воспроизводимость и масштабируемость гидрологического прогнозирования на всей территории Российской Федерации.

Реализация данного стратегического направления позволит не только повысить техническую и методологическую зрелость отрасли, но и обеспечить переход к проактивной, а не реактивной модели управления гидрологическими рисками.

2.2. Направление: «Переход к вероятностной парадигме прогнозирования»

Рост нестационарности гидрологических процессов в условиях климатических изменений требует фундаментального сдвига от традиционной детерминированной парадигмы прогнозирования к вероятностной. Такой подход позволяет не только оценивать наиболее вероятный сценарий развития гидрологической ситуации, но и количественно характеризовать степень неопределённости, связанной с метеорологическими входными данными, параметризацией моделей и внутренней изменчивостью водосборов. Переход к вероятностной парадигме является стратегически необходимым шагом для повышения устойчивости принятия решений в условиях риска и неопределённости.

2.2.1. Массовое внедрение ансамблевых методов для всех видов прогнозов (от краткосрочных до сезонных)

Планируется системное внедрение ансамблевого прогнозирования на всех временных горизонтах – от краткосрочного (0–72 ч) до сезонного (месяцы вперёд). Ансамблевый подход обеспечит формирование распределений возможных исходов (например, уровня воды, объёма стока), что важно для оценки вероятности превышения пороговых значений и своевременного запуска превентивных мер.

2.2.2. Разработка и внедрение методик интервального прогнозирования с оценкой неопределённости

В рамках вероятностной парадигмы будет реализована стандартизированная методология интервального прогнозирования, включающая квантильные оценки (например, 10-й, 50-й и 90-й перцентили) и доверительные интервалы для ключевых гидрологических переменных [1, 8]. Особое внимание будет уделено калибровке вероятностных прогнозов с использованием методов статистической постобработки (например, Bayesian Model Averaging, Nonhomogeneous Gaussian Regression), что

повысит их надёжность и согласованность с наблюдаемой частотой событий. Результаты прогнозов будут сопровождаться метриками неопределённости (например, ширина интервала, энтропия распределения), позволяющими пользователям адекватно интерпретировать уровень риска.

2.2.3. Развитие сервисов на основе вероятностных прогнозов для конкретных потребителей

Для обеспечения практической применимости вероятностной информации будут разработаны и внедрены специализированные сервисы, ориентированные на потребности ключевых отраслей. Для МЧС России – это сервисы оценки вероятности затопления населённых пунктов и расчёта зон возможного затопления с учётом сценарного анализа. Для Министерства транспорта – прогнозы вероятности нарушения судоходства из-за низких уровней воды или ледовых заторов. Для энергетического сектора – вероятностные оценки притока воды в водохранилища ГЭС, необходимые для оптимизации режимов работы и участия в рынках электроэнергии. Все сервисы будут построены на принципах ориентированных на пользователя и обеспечивать визуализацию рисков в интуитивно понятной форме (например, карты зон затопления с вероятностями, временные профили риска, индикаторы готовности к действию).

Переход к вероятностной парадигме прогнозирования позволит трансформировать гидрологическую информацию из набора детерминированных значений в инструмент управления рисками, обеспечивая более гибкое, обоснованное и устойчивое принятие решений в условиях неопределённости, характерной для климата XXI века.

2.3. Направление: «Развитие наблюдательной сети и данных»

Повышение качества и надёжности гидрологического прогнозирования напрямую зависит от полноты, точности и оперативности исходной информации о состоянии гидросферы и атмосферы. В условиях роста технологической автономии и необходимости снижения зависимости от внешних источников данных стратегическим приоритетом до 2035 года становится комплексное развитие отечественной наблюдательной инфраструктуры и создание единой, многоуровневой системы мониторинга водных ресурсов. Данное направление предусматривает синергетическую интеграцию космических, наземных и мобильных средств наблюдения с акцентом на цифровую совместимость, пространственно-временную репрезентативность и физическую достоверность данных.

2.3.1. Развитие и полное использование отечественной спутниковой группировки

Планируется завершение формирования и обеспечение устойчивой эксплуатации отечественной спутниковой группировки в интересах гидрологии, включающей аппараты серий «Арктика-М» (для мониторинга Арктики и верхних бассейнов рек Сибири), «Электро-Л» (для получения геостационарных данных о влагосодержании атмосферы, температуре поверхности и динамике облачности) и «Метеор-М» (для полярно-орбитальных наблюдений за снежным покровом, ледовыми условиями и характеристиками поверхности). Особое внимание будет уделено обеспечению непрерывности наблюдений, повышению частоты обновления данных и расширению зон покрытия, включая труднодоступные регионы Дальнего Востока и Крайнего Севера.

2.3.2. Повышение точности отечественных спутниковых продуктов

Ключевым условием эффективного использования спутниковых данных является повышение их физической достоверности и пространственно-временного разрешения. В рамках данного направления будут реализованы программы калибровки и

валидации спутниковых продуктов на основе наземных эталонных измерений. Приоритетными задачами станут улучшение алгоритмов расчёта «спутникового ветра», повышение точности оценок снежного водного эквивалента (SWE), влагозапасов почвы и характеристик ледового покрова. Развитие отечественных методик обработки спутниковых данных позволит снизить погрешности входной информации для гидрологических моделей и повысить общую надёжность прогнозов.

2.3.3. Интеграция данных с беспилотных аппаратов, радаров и сети автоматических гидрологических постов

Для обеспечения высокой пространственной детализации и оперативности мониторинга будет развиваться гибридная система наблюдений, объединяющая стационарные и мобильные источники данных. Планируется значительное расширение сети автоматических гидрологических постов (АГП) с передачей данных в режиме реального времени, а также интеграция информации с метеорологических радаров и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), используемых для локального мониторинга паводков, ледовых заторов и русловых деформаций. Все данные будут унифицированы в рамках общей архитектуры Единой цифровой платформы гидрологических данных и прогнозов, что обеспечит их совместимость, доступность и возможность использования в оперативных моделях усвоения.

2.3.4. Создание национальной системы мониторинга русловых и устьевых процессов

Особое внимание будет уделено разработке и внедрению специализированной национальной системы мониторинга русловых и устьевых гидрологических процессов – одного из слабых звеньев существующей инфраструктуры. Система будет включать сеть донных и береговых датчиков, гидролокационные комплексы, аэрогеодезические съёмки и спутниковый мониторинг морфодинамики русел. Акцент будет сделан на крупных реках с высокой динамикой русловых изменений (например, Лена, Обь, Амур) и устьевых областях рек, где взаимодействие речного стока, приливов и ледовых условий требует комплексного подхода. Получаемые данные станут основой для уточнения параметров гидродинамических моделей и повышения точности прогнозов паводков и наводнений в прибрежных территориях.

Реализация данного направления обеспечит переход от фрагментарной и частично зависимой от внешних источников системы наблюдений к автономной, многоуровневой и цифрово-интегрированной инфраструктуре, способной поддерживать высокое качество гидрологического прогнозирования в условиях меняющегося климата и растущих требований к водной безопасности.

2.4. Направление: «Развитие модельного комплекса и научной базы»

Повышение прогностической способности гидрологической службы в условиях нестационарного климата требует фундаментального обновления модельного инструментария и укрепления научно-методической базы. Стратегическое направление «Развитие модельного комплекса и научной базы» нацелено на создание иерархической системы численных моделей, охватывающей все временные и пространственные масштабы – от краткосрочных оперативных прогнозов до сверхдолгосрочных климатических сценариев, а также на разработку специализированных моделей для решения узкоспециализированных, но критически важных задач.

2.4.1. Создание и внедрение высокодетальных (1-2 км) моделей («атмосфера-суша-река»)

В рамках данного направления планируется разработка и оперативное внедрение связанных моделей, интегрирующих процессы в атмосфере, на поверхности суши и в речной сети с пространственным разрешением 1-2 км. Подобные модели позволят

учитывать обратные связи между метеорологическими условиями и гидрологическим откликом водосбора, что необходимо при прогнозировании экстремальных осадков, ливневых паводков и сложных гидрометеорологических ситуаций. Использование единой физической основы и сквозного обмена данными между компонентами модели (например, между мезомасштабной моделью ICON-RU и гидрологической моделью ECOMAG или ПЛАВ) повысит согласованность прогнозов и снизит накопление ошибок при последовательной передаче данных между отдельными системами.

2.4.2. Активное развитие и использование моделей земной системы (INM-CM) для сверхдолгосрочных и климатических прогнозов

Для обеспечения стратегического планирования в водном хозяйстве, энергетике и сельском хозяйстве будет расширено применение моделей земной системы, разрабатываемых в Институте вычислительной математики РАН (INM-CM5, INM-CM6). Эти модели, описывающие взаимодействие атмосферы, океана, криосферы, биосферы и гидросферы, станут основой для формирования сценариев изменения стока, частоты засух и паводков на десятилетних и межсезонных горизонтах. Особое внимание будет уделено адаптации глобальных выходов INM-CM к региональным условиям с использованием методов динамического и статистического даунскейлинга, а также интеграции с гидрологическими моделями для оценки воздействия климатических изменений на водные ресурсы России.

2.4.3. Разработка и верификация специализированных моделей для прогнозирования опасных гидрологических явлений

Учитывая высокую социально-экономическую значимость локальных и специфических процессов, будет реализована программа создания и оперативного внедрения узкоспециализированных моделей:

- модели русловых деформаций и размывов берегов. На основе гидродинамических и морфодинамических подходов (например, с использованием моделей типа TELEMAC, Delft3D или отечественных аналогов) будут разработаны инструменты для прогнозирования эрозии берегов, миграции русел и формирования заторов. Это особенно актуально для рек с высокой динамикой русловых процессов (Лена, Амур, Волга);

- модели опасных явлений в устьевых областях. Будут созданы связанные «река–устьевая область–море» модели для прогнозирования сгонно-нагонных явлений, затоплений при совпадении паводка и прилива, а также проникновения солёных вод в пресноводные устьевые области – критически важного фактора для водоснабжения и экосистем прибрежных регионов;

- модели ледовых явлений. Планируется развитие комплексных моделей ледообразования, движения ледяных полей и формирования заторов с учётом метеорологических условий, гидравлических характеристик и русловой морфологии для заблаговременного предупреждения ледовых заторов и затоплений в весенний период, особенно в Сибири и на севере европейской части России.

Все новые модели будут проходить многоэтапную верификацию на исторических и оперативных данных с использованием современных метрик качества (включая вероятностные и пространственные индикаторы), а также тестироваться в рамках пилотных проектов в сотрудничестве с региональными управлениями Росгидромета и заинтересованными ведомствами.

Развитие модельного комплекса и научной базы обеспечит переход к физически целостному, масштабируемому и адаптивному прогнозированию, способному отвечать вызовам как оперативного реагирования, так и долгосрочного планирования в условиях глубоких климатических и гидрологических трансформаций.

2.5. Направление: «Расширение объектов и сервисов прогнозирования»

Современные социально-экономические и геополитические приоритеты Российской Федерации, включая освоение Арктики, развитие внутреннего водного транспорта и устойчивое функционирование прибрежной инфраструктуры, требуют существенного расширения географии и тематики гидрологического прогнозирования. Традиционная система, ориентированная преимущественно на прогнозы уровня воды и паводков в среднем течении крупных рек, становится недостаточной для обеспечения комплексной водной безопасности и поддержки отраслевых решений. В этой связи стратегическое направление «Расширение объектов и сервисов прогнозирования» нацелено на тиражирование передовых методов на новые территории и сектора экономики, а также на создание специализированных, пользователь-ориентированных прогнозных продуктов.

2.5.1. Развитие системы прогнозов для Арктической зоны РФ

Арктическая зона Российской Федерации характеризуется уникальными гидрологическими условиями: коротким периодом стока, высокой чувствительностью к температурным аномалиям, сложной динамикой ледовых явлений и значительной ролью мерзлоты в формировании стока. В настоящее время система гидрологического мониторинга и прогнозирования в этом регионе остаётся фрагментарной. В рамках данного направления планируется создание специализированной подсистемы прогнозирования, включающей:

- адаптированные к криоландшафтам гидрологические модели с учётом процессов таяния снега и льда, термокарста и сезонного промерзания/оттаивания почв;

- прогнозы ледовых условий на реках и прибрежных акваториях с заблаговременностью до 10 суток;

- оценки рисков затопления посёлков и инфраструктурных объектов в период весеннего половодья и летне-осенних паводков.

Особое внимание будет уделено интеграции данных спутников «Арктика-М», наземных наблюдений и моделей земной системы для обеспечения надёжности прогнозов в условиях экстремальной нестационарности климата Арктики.

2.5.2. Создание системы оперативного прогнозирования гидрологической обстановки в устьевых областях всех крупных рек

Устьевые области рек (включая дельты Волги, Лены, Оби, Енисея, Амура и др.) представляют собой сложные гидродинамические системы, где взаимодействуют речной сток, приливно-отливные колебания, ветровые нагоны и ледовые процессы. В настоящее время прогнозирование в этих зонах осуществляется фрагментарно и без учёта морских факторов. Планируется разработка и внедрение единой системы оперативного прогнозирования гидрологической обстановки в устьях, основанной на связанных моделях «река–устьевая область–море». Система будет обеспечивать:

- прогнозы уровней воды с учётом совместного влияния речного стока и морских условий;

- оценку рисков сгонов и нагонов, ведущих к затоплениям или обмелению;

- мониторинг и прогноз проникновения солёных вод в пресноводные участки, что критично для водоснабжения и экосистем.

Реализация данного компонента позволит повысить безопасность населения и инфраструктуры в прибрежных районах.

2.5.3. Развитие сервисов для судоходства, водного транспорта и портовой инфраструктуры

Водные пути России играют ключевую роль в транспортной системе страны, особенно в удалённых регионах. Для поддержки устойчивого функционирования внутреннего водного транспорта и портовой инфраструктуры будут разработаны и внедрены специализированные гидрологические сервисы, включающие:

- прогнозы глубин и уровней воды на судоходных участках с заблаговременностью до 10 суток;
- оценки условий ледохода и ледостава для планирования навигационного периода;
- вероятностные прогнозы рисков обмеления, заторов и штормовых подъёмов в портовых акваториях;
- интерактивные карты гидрологической обстановки, интегрированные в системы управления флотом и логистикой.

Сервисы будут разрабатываться в тесном взаимодействии с Росморречфлотом, ФГУП «Росморпорт» и операторами водного транспорта, с учётом требований к точности, формату и времени доставки информации.

Расширение объектов и сервисов прогнозирования обеспечит переход от универсальных, усреднённых продуктов к дифференцированным, территориально и функционально специализированным решениям, отвечающим потребностям стратегически важных регионов и отраслей экономики.

2.6. Направление: «Интеграция и международное сотрудничество»

В условиях глобальной взаимосвязанности климатических и гидрологических процессов, а также роста трансграничных рисков, связанных с водными ресурсами, международное сотрудничество становится неотъемлемым элементом национальной стратегии развития гидрологического прогнозирования. Участие в глобальных и региональных инициативах позволяет не только обмениваться данными и передовыми практиками, но и укреплять технологический суверенитет через совместную разработку стандартов, моделей и инфраструктур. Стратегическое направление «Интеграция и международное сотрудничество» нацелено на повышение роли Российской Федерации в мировой гидрометеорологической системе и укрепление её позиций как ведущего центра компетенций в Евразийском регионе.

2.6.1. Активное участие в глобальных системах (GMAS BMO) и инициативах (Early Warnings for All)

Россия будет расширять своё участие в рамках Всемирной метеорологической организации (ВМО), в частности в реализации Глобальной мультисекторальной системы предупреждения об опасных явлениях (Global Multi-hazard Alert System, GMAS) и инициативы «Early Warnings for All» (EW4All), включая:

- обеспечение оперативной передачи национальных гидрологических данных в глобальные центры сбора и распространения информации (GISC);
- адаптацию национальной системы предупреждения к международным стандартам форматов и протоколов (например, CAP – Common Alerting Protocol);
- участие в разработке и тестировании глобальных ансамблевых прогнозов и вероятностных продуктов, ориентированных на поддержку уязвимых стран.

2.6.2. Развитие двустороннего и многостороннего обмена данными и методиками, особенно со странами СНГ

Учитывая общность трансграничных речных бассейнов (Амударья, Сырдарья, Урал, Дон, Западная Двина и др.), особое значение придаётся укреплению сотрудничества с государствами Содружества Независимых Государств. Планируется:

- создание совместных цифровых платформ для обмена гидрологическими и метеорологическими данными в режиме реального времени;

- гармонизация методик прогнозирования и критериев опасных гидрологических явлений;
- проведение совместных учений по реагированию на паводки и засухи;
- развитие программ подготовки и повышения квалификации специалистов на базе российских учебных и научных центров.

2.6.3. Позиционирование России как регионального центра компетенций в области гидрологического прогнозирования

На основе накопленного опыта, научного потенциала и уникальных природных условий (арктические территории, крупнейшие речные системы, зоны многолетней мерзлоты) Россия будет развивать статус регионального центра компетенций по гидрологическому прогнозированию в рамках ВМО и других международных структур [5-8], что предполагает:

- учреждение специализированного центра передового опыта по гидрологии в составе Росгидромета или при ведущих научных организациях (например, ГГИ, ААНИИ или ИВП РАН);
- проведение международных конференций, школ и семинаров по современным методам прогнозирования;
- оказание технической помощи и консультационной поддержки странам Евразии в модернизации их гидрологических служб.

Такая роль не только укрепит научно-техническое влияние России, но и создаст условия для привлечения международных ресурсов и совместных исследований, направленных на решение общих климатических и гидрологических вызовов.

Соответственно, интеграция в международное гидрометеорологическое сообщество и развитие регионального лидерства станут важными факторами повышения эффективности, устойчивости и глобальной конкурентоспособности российской системы гидрологического прогнозирования в долгосрочной перспективе до 2035 года.

3. Механизмы реализации и целевые показатели

Для обеспечения последовательного и эффективного достижения стратегических целей развития гидрологического прогнозирования в Российской Федерации до 2035 года предусмотрены чёткие этапы реализации, а также система измеримых целевых показателей, отражающих как технологический прогресс, так и операционную эффективность системы.

3.1. Этапы реализации

Реализация стратегии будет осуществляться в два этапа (рис. 3), обеспечивающих поэтапный переход от научно-технической разработки к полномасштабному внедрению в оперативную практику.



Рис. 3. Этапы реализации стратегии развития гидрологического прогнозирования до 2035 года (рисунок автора)

– I этап (2025-2030 гг.) – формирование технологического задела и пилотное внедрение.

На данном этапе будет завершена разработка ключевых компонентов новой прогнозной системы: Единой цифровой платформы гидрологических данных, вероятностных и связанных моделей, специализированных сервисов для Арктики и устьевых областей рек. Планируется развертывание пилотных проектов в приоритетных регионах (например, бассейны рек Волги, Лены, Амура), включая тестирование автоматизированных ГИС-платформ, ансамблевого прогнозирования и интеграции данных с беспилотных систем. Одновременно будет проведена модернизация части наблюдательной сети и начато обучение кадров по новым методикам.

– II этап (2031-2035 гг.) – масштабирование и интеграция в оперативную практику.

На этом этапе произойдет полномасштабное внедрение разработанных решений во все территориальные органы Росгидромета и заинтересованные ведомства. Будет завершено формирование национальной системы мониторинга русловых и устьевых процессов, обеспечена полная интеграция метеорологических и гидрологических моделей, а также завершено импортозамещение критически важных компонентов.

3.2. Целевые показатели к 2035 году

Для объективной оценки результативности реализации стратегии определен набор количественных целевых показателей, согласованных с национальными приоритетами в области климатической устойчивости, цифровой трансформации и технологического суверенитета:

– доля вероятностных прогнозов в общем объеме гидрологических прогнозов – не менее 80 %, что обеспечит переход к управлению рисками на основе количественной оценки неопределенности;

– заблаговременность долгосрочных (сезонных) прогнозов – увеличение до 3-6 месяцев, что позволит эффективно планировать режимы работы водохранилищ, сельскохозяйственные и противоаварийные мероприятия;

– снижение средней рабочей нагрузки на одного прогнозиста – на 30 % за счет автоматизации рутинных операций, внедрения ИИ-ассистентов и цифровых платформ поддержки принятия решений;

– оправдываемость предупреждений об опасных гидрологических явлениях (ОЯ) – повышение до 98 %, что соответствует лучшим мировым практикам и значительно усилит доверие со стороны органов власти и населения;

– полное импортозамещение критических технологий и данных, включая программное обеспечение, спутниковые продукты, сенсоры и компоненты наблюдательной инфраструктуры, что обеспечит технологическую независимость и устойчивость системы в условиях внешних ограничений.

Достижение указанных показателей будет обеспечиваться через государственные программы, научно-технические проекты, межведомственное взаимодействие и международное сотрудничество, а также через создание благоприятных условий для привлечения молодых специалистов и постоянного обновления кадрового потенциала.

Заключение

Реализация предложенной стратегии развития гидрологического прогнозирования до 2035 года позволит создать современную, технологически автономную систему, ориентированную на конкретные потребности воднотранспортного комплекса России. Цифровая трансформация, переход к вероятностным прогнозам и интеллектуализация сервисов обеспечат качественно новый уровень

гидрометеорологического обеспечения судоходства и приведет к повышению точности и заблаговременности прогнозов ледовой обстановки, волнения, уровней воды и течений на ключевых морских путях и внутренних водных артериях.

Внедрение стратегии повлияет на повышение безопасности мореплавания, сокращение аварийности и непроизводительных простоев флота. Создание специализированных прогностических продуктов для акваторий портов и систем поддержки принятия решений для капитанов и судоводителей позволит оптимизировать логистику, минимизировать риски повреждения судов и портовой инфраструктуры и, как следствие, снизить эксплуатационные издержки отрасли.

Ключевыми факторами успешной реализации стратегии применительно к транспортной сфере являются:

– эффективная межведомственная интеграция, включая тесное взаимодействие Росгидромета с Минтрансом, Росморречфлотом, администрациями портов и судоходными компаниями для обеспечения адресности и практической ценности прогностической информации;

– целевое финансирование и инвестиции, выделение средств не только на модернизацию наблюдательной сети в целом, но и на развертывание специализированных измерительных комплексов в акваториях портов и на узловых участках внутренних водных путей;

– кадровое и научное обеспечение, в том числе подготовка специалистов, способных работать на стыке гидрологии и транспортной логистики, и ориентация научных исследований на разработку прикладных методик и моделей, непосредственно востребованных в оперативной работе транспортного комплекса.

Последовательная реализация предложенных направлений позволит не только устранить существующие технологические разрывы, но и вывести гидрометеорологическое обеспечение водного транспорта России на уровень, соответствующий современным задачам и потребностям устойчивого развития отрасли.

Список литературы

1. Презентации докладов, представленных на 8 всероссийском объединенном метеорологическом и гидрологическом съезде (октябрь 2024 г., Санкт-Петербург). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://фумо05.рф/о371-Meteorological_Hydrological_Congress.htm (дата обращения: 04.11.2025).
2. Волкова, Н. А. Комплексный подход к снижению аварийности на внутренних водных путях арктического региона России / Н. А. Волкова // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2025. – Т. 22, № 3. – С. 761-775. – DOI 10.20295/1815-588X-2025-3-761-775.
3. Волкова, Н. А. Методика долгосрочного прогнозирования максимальных уровней воды на примере реки Пур / Н. А. Волкова, М. Н. Волков, К. В. Ромашова // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. – 2025. – Т. 35, № 3. – С. 375-387. – DOI 10.35634/2412-9518-2025-35-3-375-387. – EDN FJXCDS.
4. Симонов, Ю. А. Оперативная гидрология в деятельности Всемирной метеорологической организации / Ю. А. Симонов // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2025. – № 2(396). – С. 121-140. – DOI 10.37162/2618-9631-2025-2-121-140. – EDN RDCSRC.
5. ВМО-№ 485. Наставление по Комплексной системе обработки и прогнозирования ВМО. Дополнение IV к Техническому регламенту ВМО. Всемирная метеорологическая организация, 2023. 185 с.
6. ВМО-№ 1273. Атлас смертности и экономических потерь в результате экстремальных метеорологических, климатических и гидрологических явлений (1970-2019 гг.). Всемирная метеорологическая организация, 2021. 90 с.
7. ВМО-№ 1319. Перспективное видение, Стратегия и соответствующий План действий в области гидрологии и Стратегия гидрологических исследований ВМО. Всемирная метеорологическая организация, 2023. 67 с.

8. ВМО-№ 1381. В центре внимания инициатива «Заблаговременные предупреждения для всех»: мониторинг и прогнозирование опасных явлений. Всемирная метеорологическая организация, 2025. 91 с.
9. Dasgupta A. et al. Connecting hydrological modelling and forecasting from global to local scales: Perspectives from an international joint virtual workshop // *Journal of Flood Risk Management*. – 2025. – Т. 18. – №. 1. – С. e12880.
10. Jahangir M. S., Quilty J. Hierarchical deep learning for consistent multi-timescale hydrological forecasting // *Water Resources Research*. – 2025. – Т. 61. – №. 7. – С. e2024WR038105.
11. Li F. et al. Reanalysis and forecasting of total water storage and hydrological states by combining machine learning with CLM model simulations and GRACE data assimilation // *Water Resources Research*. – 2025. – Т. 61. – №. 2. – С. e2024WR037926.
12. Ougahi J. H., Rowan J. S. Enhanced streamflow forecasting using hybrid modelling integrating glacio-hydrological outputs, deep learning and wavelet transformation // *Scientific Reports*. – 2025. – Т. 15. – №. 1. – С. 2762.
13. Pechlivanidis I. G. et al. Enhancing research-to-operations in hydrological forecasting: innovations across scales and horizons // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2025. – Т. 106. – №. 5. – С. E894-E919.
14. Solanki H. et al. Improving streamflow prediction using multiple hydrological models and machine learning methods // *Water Resources Research*. – 2025. – Т. 61. – №. 1. – С. e2024WR038192.
15. Zhang J., Li W., Duan Q. Quantifying the contributions of hydrological pre-processor, post-processor, and data assimilator to ensemble streamflow prediction skill // *Journal of Hydrology*. – 2025. – Т. 651. – С. 132611.

References

1. Presentations of papers presented at the 8th All-Russian Joint Meteorological and Hydrological Congress (October 2024, St. Petersburg). Web. 4 Nov 2025 <https://fumo05.rf/o371-Meteorological_Hydrological_Congress.htm>.
2. Volkova, N. A. An integrated approach to reducing accidents on inland waterways of the Arctic region of Russia / N. A. Volkova // *Bulletin of the St. Petersburg University of Railway Engineering*. – 2025. – Vol. 22, No. 3. – Pp. 761-775. – DOI 10.20295/1815-588X-2025-3-761-775.
3. Volkova, N. A. Methodology for long-term forecasting of maximum water levels using the Pur River as an example / N. A. Volkova, M. N. Volkov, K. V. Romashova // *Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*. - 2025. - Vol. 35, No. 3. - P. 375-387. - DOI 10.35634/2412-9518-2025-35-3-375-387. - EDN FJXCDS.
4. Simonov, Yu. A. Operational hydrology in the activities of the World Meteorological Organization / Yu. A. Simonov // *Hydrometeorological research and forecasts*. - 2025. - No. 2 (396). - P. 121-140. – DOI 10.37162/2618-9631-2025-2-121-140. – EDN RDCSRC.
5. WMO-No. 485. Manual on the WMO Integrated Processing and Forecasting System. Annex IV to the WMO Technical Regulations. World Meteorological Organization, 2023. 185 p.
6. WMO-No. 1273. Atlas of Mortality and Economic Losses due to Extreme Weather, Climate and Hydrological Events (1970–2019). World Meteorological Organization, 2021. 90 p.
7. WMO-No. 1319. WMO Vision, Strategy and Associated Action Plan for Hydrology and Strategy for Hydrological Research. World Meteorological Organization, 2023. 67 p.
8. WMO-No. 1381. Spotlight on the Early Warning for All Initiative: Hazard Monitoring and Forecasting. World Meteorological Organization, 2025. 91 p.
9. Dasgupta A. et al. Connecting hydrological modelling and forecasting from global to local scales: Perspectives from an international joint virtual workshop // *Journal of Flood Risk Management*. - 2025. - Vol. 18. - No. 1. - P. e12880.
10. Jahangir M. S., Quilty J. Hierarchical deep learning for consistent multi-timescale hydrological forecasting // *Water Resources Research*. - 2025. - Vol. 61. - No. 7. – P. e2024WR038105.
11. Li F. et al. Reanalysis and forecasting of total water storage and hydrological states by combining machine learning with CLM model simulations and GRACE data assimilation // *Water Resources Research*. – 2025. – Т. 61. – No. 2. – P. e2024WR037926.

12. Ougahi J. H., Rowan J. S. Enhanced streamflow forecasting using hybrid modeling integrating glacio-hydrological outputs, deep learning and wavelet transformation // *Scientific Reports*. – 2025. – Т. 15. – No. 1. – P. 2762.
13. Pechlivanidis I. G. et al. Enhancing research-to-operations in hydrological forecasting: innovations across scales and horizons // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2025. – Т. 106. – No. 5. – pp. E894-E919.
14. Solanki H. et al. Improving streamflow prediction using multiple hydrological models and machine learning methods // *Water Resources Research*. – 2025. – Т. 61. – No. 1. – P. e2024WR038192.
15. Zhang J., Li W., Duan Q. Quantifying the contributions of hydrological pre-processor, post-processor, and data assimilator to ensemble streamflow prediction skill // *Journal of Hydrology*. – 2025. – Т. 651. – P. 132611.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Волкова Надежда Александровна, к.ф.-м.н., доцент кафедры водно-технических изысканий, Российский государственный гидрометеорологический университет (ФГБОУ ВО «РГГМУ»), 192007, Россия, Санкт-Петербург, Воронежская улица, дом 79, старший научный сотрудник отдела гидрологии устьев рек и водных ресурсов, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (ФГБУ «АНИИ»), e-mail: navolkova@aari.ru

Nadezhda A. Volkova, PhD, Associate Professor, Department of Water Engineering Surveys, Russian State Hydrometeorological University (RSHU), 79 Voronezhskaya Street, St. Petersburg, 192007, Russia; Senior Researcher, Department of River Estuary Hydrology and Water Resources, Arctic and Antarctic Research Institute

Статья поступила в редакцию 05.11.2025; принята к публикации 16.12.2025; опубликована онлайн 20.03.2026. Received 05.11.2025; published online 20.03.2026.

УДК 004.942

DOI: 10.37890/jwt.vi86.672

Оценка влияния работы гребных винтов и габаритов судоходного канала на размыв дна 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: Единая глубоководная система (ЕГС), включает в себя крупные судоходные реки и каналы, часть из которых пересекают магистральные трубопроводы. Последние, как показывает практика, зачастую имеют небольшую глубину заложения, что может при эксплуатации под действием ряда факторов приводить к возникновению отклонений их плано-высотного положения. В связи с зарегулированностью отдельных судоходных каналов, которое сопровождается снижением скорости естественного течения, основными факторами, влияющими на размыв дна канала, являются последствия движения судов. Помимо скорости судна, на донную эрозию оказывает влияние стеснение площади живого сечения канала по ширине и глубине и работа гребных винтов. Оценить влияние обоих факторов на изменение интенсивности донной эрозии в канале можно с помощью выполнения математического моделирования. В данной статье представлены результаты математического моделирования движения судна проекта 507Г-020-012 по каналу и дана оценка влияния исследуемых факторов на размыв дна.

Ключевые слова: безопасность судоходства, математическое моделирование, вычислительная гидродинамика, судоходный канал

Assessing the impact of propeller operation and the dimensions of the shipping channel on bottom erosion 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: The Unified Deepwater System (UDS) includes major shipping rivers and canals, some of which are crossed by main pipelines. The latter, as practice shows, are often shallow, which, during operation, can lead to deviations in their planned and vertical positions under the influence of a number of factors. Due to the regulation of individual shipping channels, which is accompanied by a decrease in the natural flow velocity, the main factors influencing channel bottom erosion are the effects of vessel movement. In addition to vessel speed, bottom erosion is affected by the narrowness and depth of the channel's cross-sectional area and the operation of propellers. The influence of both factors on changes in the intensity of bottom erosion in the channel can be assessed using mathematical modeling. This article presents the results of mathematical modeling of the movement of a Project 507G-020-012 vessel through the canal and provides an assessment of the influence of the studied factors on bottom erosion.

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 прилегающих областях [1]. При отсутствии на ряде каналов естественного течения, в связи с их зарегулированностью, интенсивность гидродинамических процессов зависит, в том числе, от степени стеснения площади живого сечения канала и работы судовых движителей. Это имеет важное значение для обеспечения устойчивости подводных переходов магистральных трубопроводов от размыва дна. Какое влияние оказывают оба фактора на гидродинамические процессы вблизи дна канала можно выявить с использованием математического моделирования.

Материалы и методы

Для определения степени влияния работы судовых движителей и площади живого сечения канала на гидродинамические процессы вблизи дна канала была разработана математическая модель, которая включает в себя судно и участок судоходного канала. Судно состоит из корпуса и двух движителей (гребных винтов) с внешним диаметром 1,8 м. Участок канала протяженностью 1970 м, шириной B_k 40,1 м, 50,1 м и 70,1 м, глубиной H_k 4,5 м. Для описания турбулентных процессов, возникающих в канале при движении судна и работе гребных винтов, была выбрана модель турбулентности $K - \epsilon$ [2][3][4][5].

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

Была разработана геометрия расчетного судна, представленная его общей конфигурацией и основными элементами в виде кормовой и носовой частей и гребных винтов. Для каждого элемента математической модели сгенерирована объёмная расчетная сетка, характеризующаяся количеством и формой ячеек. Геометрия расчетного судна представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Общая конфигурация судна

Для математического моделирования движения судна использована зависимость скорости хода судна на тихой воде и частоты вращения его движителей. Такая взаимосвязь имеет вид кривой, которая строится на основе результатов тяговых расчетов. Для судна проекта 507Г-020-012 такая зависимость представлена на рисунке 2.

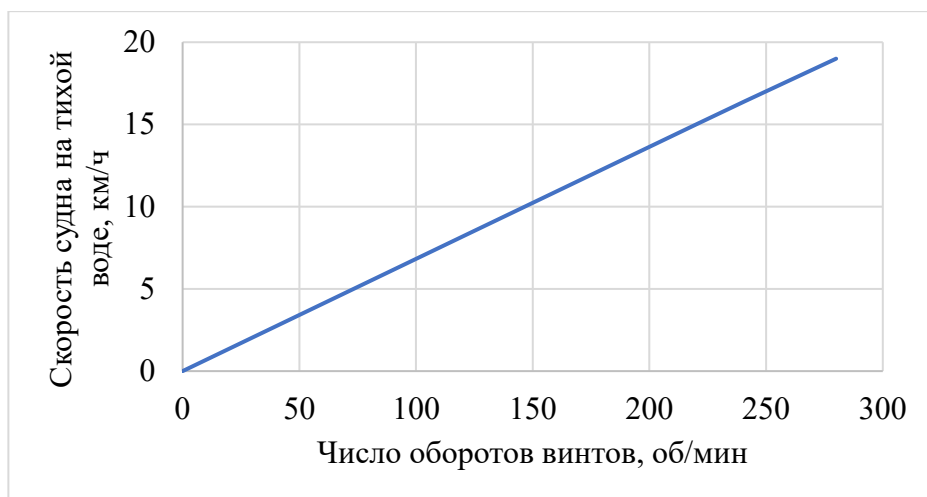


Рис. 2. Зависимость скорости судна от числа оборотов двигателей

Для моделирования принята скорость движения судна $V_c = 10,0$ км/ч, которая достигается, в соответствии с представленным выше графиком, при вращении обоих двигателей с частотой $\omega_b = 147,14$ об/мин.

Математическая модель рассчитана в четырех вариациях: М1, М2, М3 и М4, характеристики которых приведены в таблице 2 и на рисунке 3.

Таблица 2

Основные характеристики вариаций математической модели

№ вариации	Скорость судна, км/ч	Скорость вращения винтов, об/мин	Площадь поперечного сечения канала, м ²	Ширина канала, м	Глубина канала, м	Моделируемое время движения судна, с
М1	10	0	225,45	50,1	4,5	600
М2	10	147,14	225,45	50,1	4,5	600
М3	10	147,14	315,45	70,1	4,5	600
М4	10	147,14	180,45	40,1	4,5	600

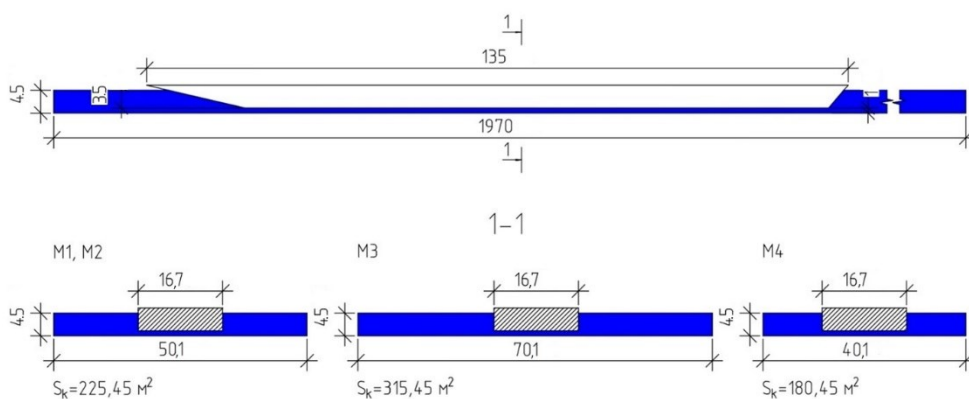


Рис. 3. Геометрические характеристики вариаций М1-М4

Примечание: размеры приведены в метрах

Целью математического моделирования явилось исследование гидродинамических процессов, возникающих вблизи дна канала при прохождении судна и оценка влияния на них таких факторов, как работа гребных винтов с частотой вращения ω_v , об/мин, площадь живого сечения S_k , м² и коэффициент стеснения живого сечения канала Ω . Коэффициент стеснения живого сечения канала определяется по следующей формуле:

$$\Omega = \frac{S_c}{S_k},$$

где S_k – площадь живого сечения канала, м²;

S_c – площадь живого сечения канала, перекрываемая корпусом судна, м².

Для исследования гидродинамических процессов, возникающих вблизи дна канала, был создан контрольный индикатор – плоское сечение, расположенное на расстоянии 0,1 м от дна канала.

В процессе моделирования фиксировалась максимальная скорость движения воды V_{max} в заданном контрольном индикаторе, что позволит сделать общие выводы о влиянии работы движителей и площади живого сечения канала на гидродинамические процессы, возникающие вблизи дна и его размыв.

Результаты

По результатам проведения математического моделирования построены графики изменения максимальной скорости течения вблизи дна канала при движении судна с вращением и без вращением движителей, а также при движении судна на канале разной ширины и глубины. Дополнительно на графики нанесены осредненные значения максимальной скорости течения вблизи дна канала. Графики приведены на рисунке 4.

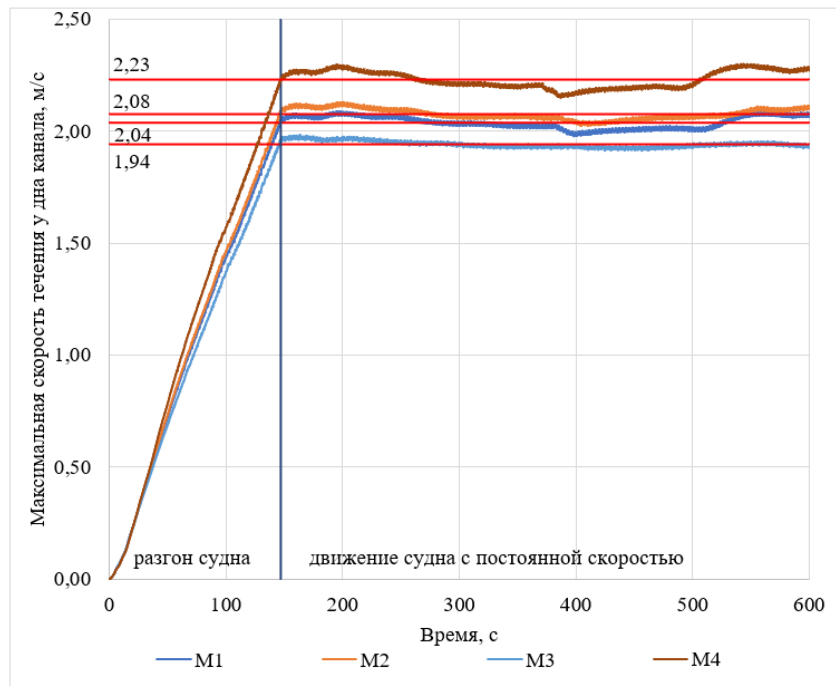


Рис. 4. Графики изменения максимальной скорости течения вблизи дна канала

Для наглядности, мониторинг изменения скалярного скоростного поля потока в процессе моделирования осуществляется с помощью специальных сцен, одна из которых представлена на рисунке 5 в разном масштабе представления.

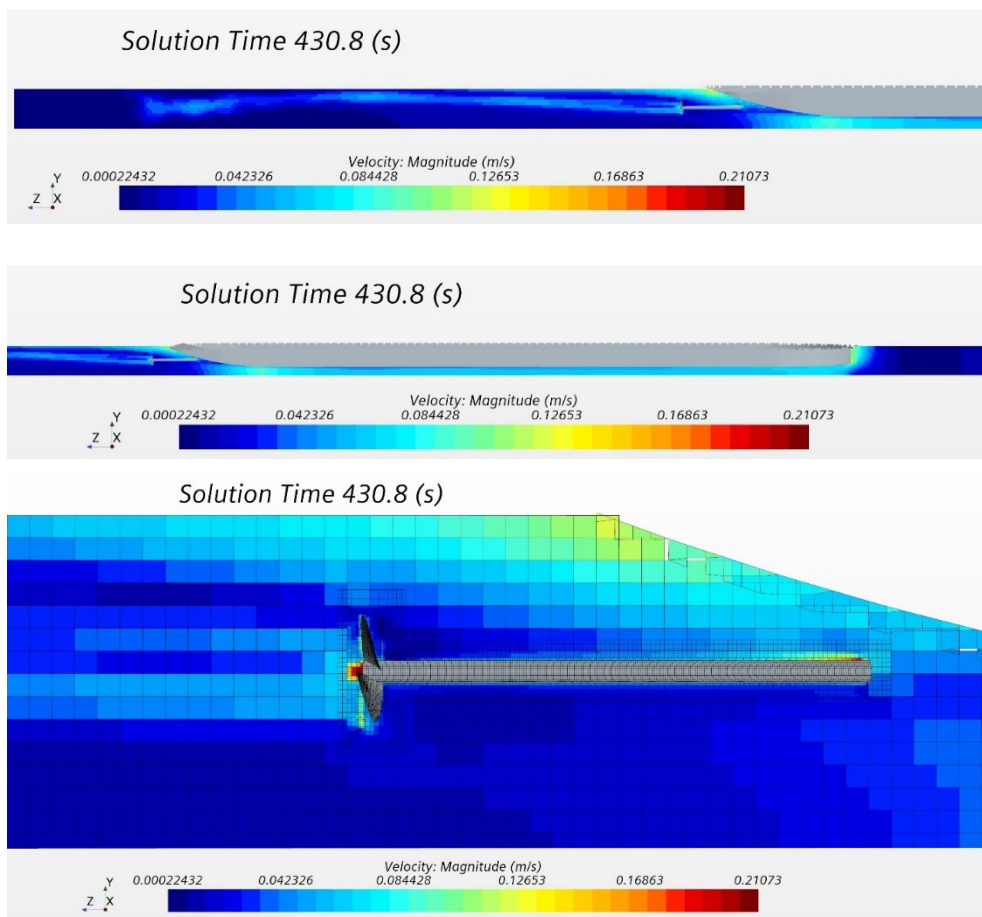


Рис. 5. Скалярное скоростное поле потока на момент времени 430,8 с

Обработка графиков позволила получить осредненные значения максимальной скорости течения вблизи дна канала. Результаты представлены на рисунке 6 и в таблице 3.

Таблица 3

Результаты математического моделирования

№ вариации	M1	M2	M3	M4
Максимальная скорость течения у дна канала, м/с	2,04	2,08	1,94	2,23
Коэффициент стеснения живого сечения канала	0,26	0,26	0,19	0,32

По полученным значениям были построены графики зависимости максимальной скорости течения вблизи дна канала V_{max} от площади живого сечения канала S_k и коэффициента стеснения живого сечения Ω (рисунок 7).

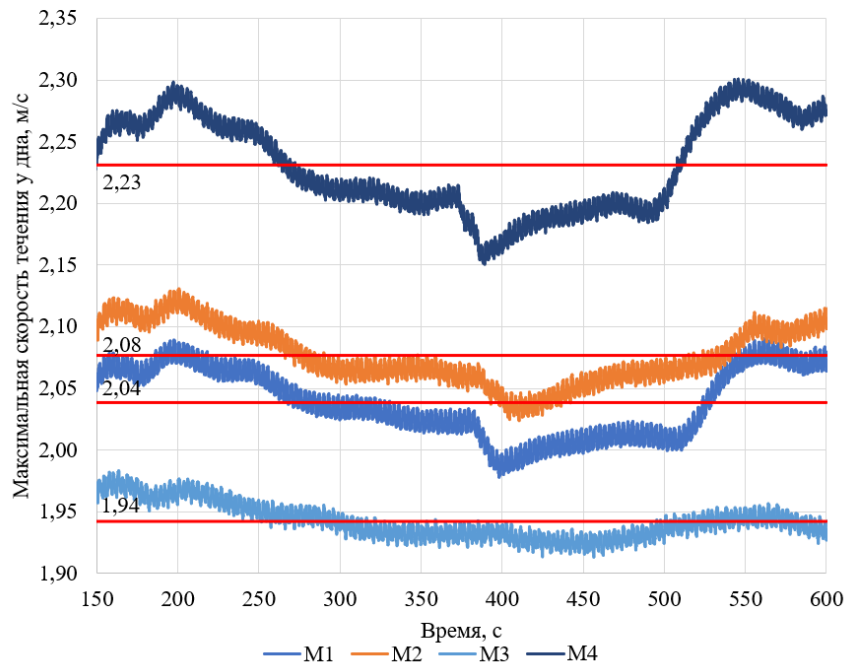


Рис. 6. Мгновенные и осредненные значения максимальной скорости течения вблизи дна канала

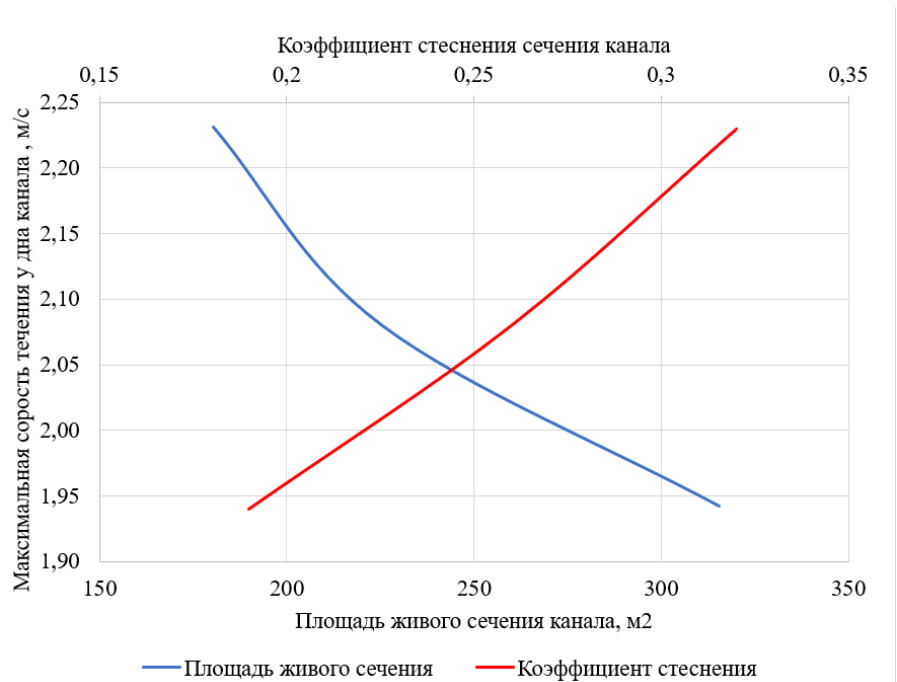


Рис. 7. График зависимости максимальной скорости течения вблизи дна канала от площади живого сечения канала и коэффициента стеснения

Вместе с тем, вопрос влияния стеснения площади живого сечения канала на гидродинамические процессы вблизи дна требует более детального рассмотрения. Так как площадь поперечного сечения канала прямоугольной формы определяется

произведением ширины на глубину, целесообразно исследовать влияние каждого параметра на величину скорости течения у дна канала. Для этих целей разработаны и рассчитаны три вариации математической модели, описывающей движение судна по каналу со скоростью 10 км/ч. Вариации отличаются между собой параметрами канала. Характеристики вариаций модели и результаты математического моделирования представлены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты эксперимента

№ вариации	Ширина канала, м	Глубина канала, м	Площадь поперечного сечения, м ²	Коэффициент стеснения	Максимальная скорость течения у дна канала, м/с
1	50,1	4,5	225,45	0,26	2,08
2	50,1	5,0	250,50	0,23	1,52
3	70,1	4,5	315,45	0,19	1,94

По результатам математического моделирования получено, что:

- при увеличении ширины канала на 20 м (на 40%), при одинаковой глубине, максимальная скорость течения вблизи дна уменьшается на 6,73%;
- при увеличении глубины канала на 0,5 м (на 11%), при одинаковой ширине, максимальная скорость течения вблизи дна канала уменьшается на 26,92%.

Адекватность результатов моделирования была подтверждена с помощью математических критериев физичности модели, в частности был использован критерий Куранта-Фридриха-Леви (CFL) [6], значение которого на протяжении всего расчета модели не превышало допустимой максимальной величины, а в отдельных областях модели его значение достигало единицы, что является идеальным [7], [8].

Заключение

По результатам математического моделирования гидравлики потока сделаны следующие выводы:

При прохождении судна проекта 507Г-020-012 по каналу, имеющему ширину 50,1 м и глубину 4,5 м, с постоянной скоростью 10 км/ч, работа двигателей оказывает незначительное влияние на гидродинамические процессы, возникающие вблизи дна канала. Максимальная скорость течения, возникающая при прохождении по каналу судна с работающими двигателями, оказалась всего лишь на $\approx 2\%$ больше скорости течения, возникающей при прохождении судна с покоящимися двигателями. Отсюда следует, что наибольшее влияние на гидродинамические процессы, возникающие вблизи дна канала при прохождении по нему судов, оказывает стеснение его живого сечения.

Было установлено, что наибольшее влияние на скорость течения вблизи дна оказывает изменение глубины канала, нежели ширины, поскольку:

- при увеличении ширины канала на 40%, максимальная скорость течения вблизи дна канала уменьшается на 6,73%;
- при увеличении глубины канала на 11%, максимальная скорость течения вблизи дна канала уменьшается на 26,92%.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости учета стеснения живого сечения канала при исследовании возникающих в нем гидродинамических процессов, влияющих на скоростной режим движения судов и составов и, соответственно, на размыв дна канала.

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.

2. 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>
3. Yakhov, V., Orszag, S.A., Thangam, S., Gatski, T.B. and Speziale, C.G. 1992, ‘Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique’, Physics of Fluids A, Vol. 4, No.7 DOI:10.1063/1.858424.
4. Durbin, P.A. 1991. “Near-wall turbulence closure modeling without damping functions, Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 3, pp. 1-13.
5. Poinso, T. J. and Lele, S.K., 1992. “Boundary Conditions for Direct Simulations of Compressible Viscous Flows,” J. of Comp. Physics, 101, pp. 104-129.
6. R. Courant, K. Friedrichs, H. Lewy. Über die partiellen Differenzgleichungen 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. – М.: 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. (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>
3. Yakhov, V., Orszag, S.A., Thangam, S., Gatski, T.B. and Speziale, C.G. 1992, ‘Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique’, Physics of Fluids A, Vol. 4, No.7 DOI:10.1063/1.858424.
4. Durbin, P.A. 1991. “Near-wall turbulence closure modeling without damping functions”, Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 3, pp. 1-13.
5. Poinso, T. J. and Lele, S.K., 1992. “Boundary Conditions for Direct Simulations of Compressible Viscous Flows,” J. of Comp. Physics, 101, pp. 104-129.
6. R. Courant, K. Friedrichs, H. Lewy. Über die partiellen Differenzgleichungen 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. – М.: 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»», 603951, 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»», 603951, 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 Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 01.11.2025; принята к публикации 22.01.2026; опубликована онлайн 20.03.2026. Received 01.11.2025; published online 20.03.2026.

УДК 659.62

DOI: 10.37890/jwt.vi86.677

Ледовый паспорт речного ледокола: оптимизация проекта

В.А. Лобанов

ORCID: 0000-0002-0931-7317

В.И. Тихонов

ORCID: 0000-0002-3147-0668

Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Статья завершает цикл авторских публикаций с обзором ледовых качеств речного ледокола проекта 1191 типа «Капитан Евдокимов».

Отмечено, что исследованное судно стало реализацией экспериментального проекта в речном ледоколостроении – принципиального изменения традиционных ледокольных обводов корпуса судна. В качестве положительного результата этого эксперимента зафиксирован высокий уровень критерия «ледопроходимость/осадка» у данного судна, что сохраняет группировку ледоколов проекта 1191 в активной эксплуатации.

В качестве «негатива» эксперимента показано, что относительная ледовая ходкость по сравнению с предыдущим проектом ледоколов (1105) не была улучшена, а ледовая маневренность значительно ухудшена.

Заявлено, что в связи с «истощением» ресурса этих ледоколов в настоящее время обострилась проблема обновления ледокольного флота для ВВП и мелководных морских районов РФ. При этом критический анализ накопленного эксплуатационного и научного опыта должен стать основой разработки перспективных проектов речных ледокольных средств с применением современных CAE-технологий.

Ключевые слова: ледяной покров, ледокол, ледовые качества, ледокольный корпус

Ice passport of a river icebreaker: project optimization

Vasily A. Lobanov

ORCID: 0000-0002-0931-7317

Vadim I. Tikhonov

ORCID: 0000-0002-3147-0668

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article completes a series of author's publications with an overview of the ice performances of the Kapitan Evdokimov type 1191 river icebreaker.

It is noted that the investigated vessel became the implementation of an experimental project in river icebreaking – a fundamental change in the traditional icebreaking contours of the vessel's hull. As a positive result of this experiment, a high level of the criterion «ice breaking/draft» was protected for this vessel, which preserves the grouping of icebreakers of project 1191 in active operation.

As a «negative» of the experiment, it was shown that the relative ice propulsion ability compared to the previous icebreaker project (1105) was not improved, and ice maneuverability was significantly worsened.

It is stated that due to the «depletion» of the resource of these icebreakers, the problem of updating the icebreaker fleet for the inland waterway and shallow-water marine areas of the Russian Federation has now become more acute. At the same time, a critical analysis of the accumulated operational and scientific experience should become the basis for the development of promising projects for river icebreaking vessels using modern CAE technologies.

Keywords: ice cover, icebreaker, ice performances, icebreaker hull

Дискуссия

Настоящая работа подводит итог по ряду авторских публикаций с обзором ледовых качеств речного ледокола проекта 1191 типа «Капитан Евдокимов» [1-4]. Оценка таковых качеств была произведена только по натурно подтвержденным данным: официальным полевым испытаниям, многолетним научно-оперативным сопровождениям ледовых транспортных операций с участием судов данного проекта, различных рукописных источников, авторских архивов [5, 6].

Исследованное судно стало реализацией экспериментального проекта в речном ледоколостроении [7]. При этом следует признать, что эксперимент оказался неудачным. Пожалуй, единственным достоинством ледоколов данного типа является высокий уровень критерия «ледопроходимость/осадка». Последнее пока оправдывает их содержание в ледокольной группировке «Росморпорта» даже при ощутимом возрасте проекта (более 40 лет).

Требования заказчика (МРФ РСФСР) к минимизации осадки ледокола с сохранением его большого водоизмещения и высокой мощности СЭУ (не менее, чем у предыдущей серии, проект 1105 типа «Капитан Чечкин» [8]) спровоцировали конструкторов и судостроителей к принципиальному отказу от традиционных ледокольных обводов корпуса, проверенных «хорошей ледовой практикой». При этом на этапе проектирования не был реализован научный прогноз основных ледовых качеств потенциального судна. Поэтому уже начальный период их эксплуатации выявил ошибочность базовых проектных решений: удельная ледопроходимость не превысила уровень у ледокола проекта 1105, маневренные качества во льдах (и, особенно, поворотливость) значительно ухудшились (Рис.1 [6]). Последующие пробные попытки «косметических» правок у некоторых «подопытных» ледоколов этого типа уже не смогли оптимизировать проект.

Серийно было введено в эксплуатацию восемь судов проекта 1191 (март 1983 года – май 1986 года). С началом «перестроечного» периода и политической неустойчивости в стране, перераспределением и приватизацией государственного флота, ухудшением экономической ситуации с последующим отказом государственного финансирования строительство этих ледоколов было прекращено (а, равно, и серийное речное ледоколостроение). При этом необходимо отметить, что при всех недостатках данного проекта в настоящее время отсутствует альтернатива этим судам на внутренних водных путях и в прибрежных морских районах России. Однако их истощенный ресурс бесспорно актуализировал проблему обновления ледокольного флота для ВВП РФ, решение которой доступно только при государственной поддержке [9-11]. Критический анализ накопленного опыта должен стать основой разработки перспективных проектов речных ледокольных средств.

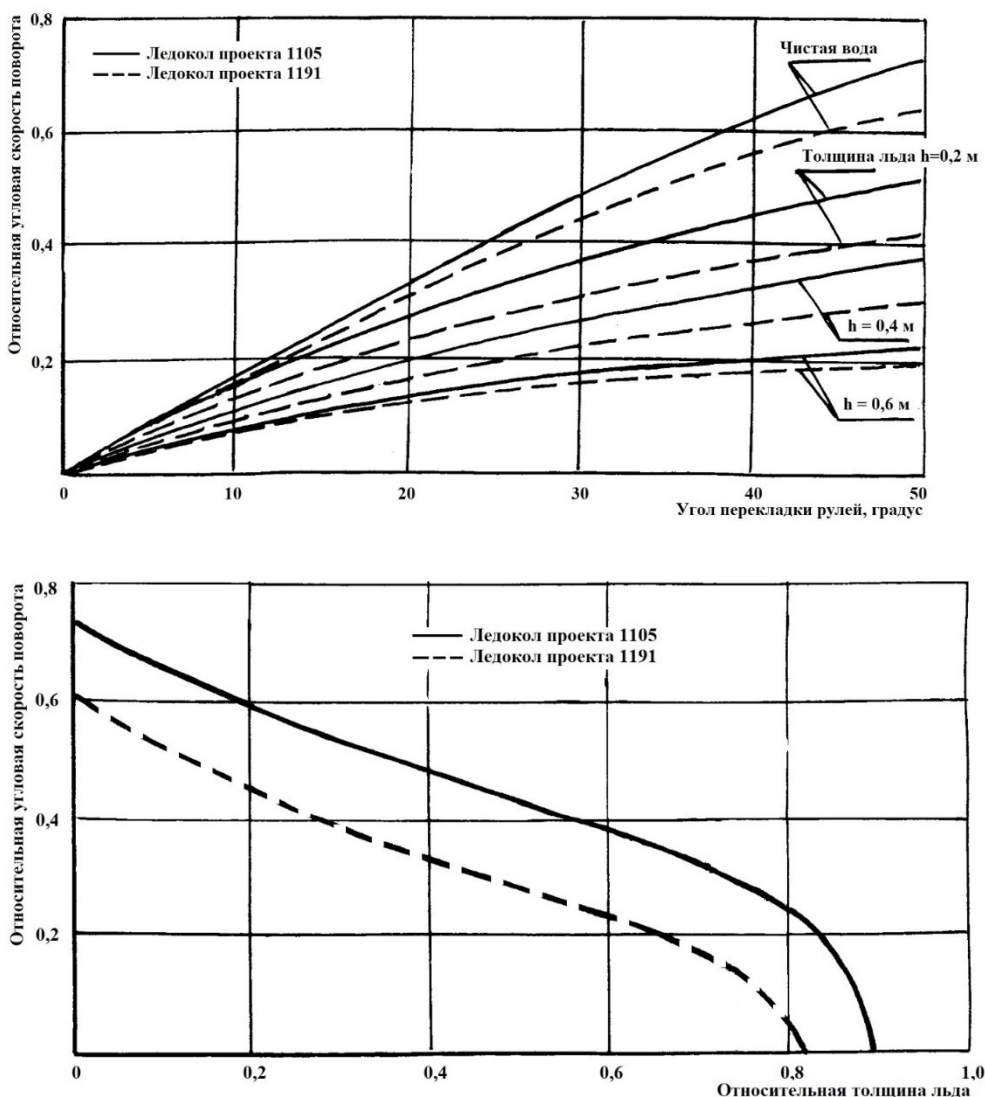


Рис. 1. Характеристики поворотливости ледоколов проектов 1105 и 1191 в сплошном льду

Оптимизация формы корпуса

При разработке ледового паспорта в первоначальный проект этого документа были включены рекомендации по улучшению поворотливости исследуемого судна, разработанные на основе трудов [12-14]. Однако в большей степени эти предложения носили качественный характер, что вызывало сомнения в пользу их публикации в паспорте. Оптимизация требовала научно обоснованных количественных изменений теоретического чертежа ледокола при разработке нового проекта. Первые попытки создать полуэмпирическую методику для решения этой задачи были представлены только в 1988 году [15], а до численного применения она была доведена лишь к 1990 году [6].

Для наглядной иллюстрации влияния формы корпуса судна на параметры поворотливости во льду, были сгенерированы три модели исследуемого ледокола: фактический (базовый) проект – 1191; модифицированные – 1191а и 1191б. При

сохранении осадки и водоизмещения судна, несколько увеличены длина и ширина модифицированных проектов, но уменьшены коэффициенты полноты ватерлинии и общей полноты судна. Сравнительные характеристики формы корпуса базового и модифицированных ледоколов приведены в табл. 1, а вид их ватерлиний показан на рис. 2.

Таблица 1

Характеристики формы корпуса ледоколов

Характеристики корпуса	Модели ледоколов		
	1191 (базовая)	1191a	11916
Длина, м	73,0	76,0	79,0
Ширина, м	16,0	16,3	16,5
Осадка, м	2,5	2,5	2,5
Коэффициент общей полноты корпуса	0,75	0,71	0,65
Угол входа ватерлинии на нулевом теоретическом шпангоуте, рад [6]	1,05	0,98	0,98
Коэффициент общей полноты ватерлинии	0,92	0,8	0,78
Коэффициент полноты носовой ветви ватерлинии	0,85	0,85	0,85
Коэффициент полноты кормовой ветви ватерлинии	0,95	0,77	0,75
Параметр формы корпуса [6]	0,3	0,3	0,3

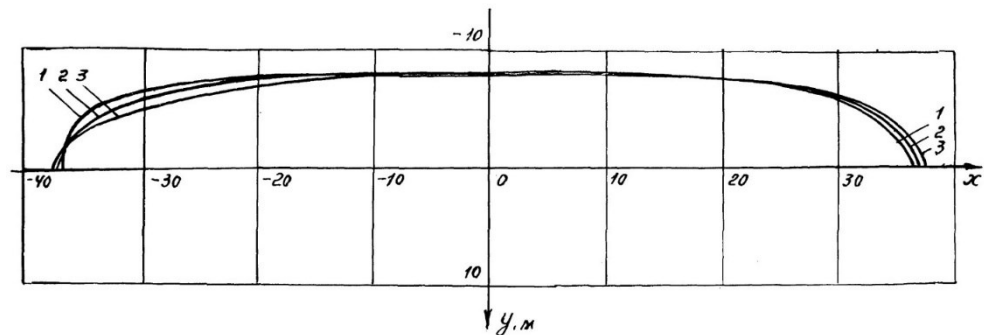


Рис. 2. Ватерлинии моделей ледоколов (1 – 1191; 2 – 1191a; 3 – 11916)

Поскольку предметом анализа являлась поворотливость, основное внимание уделено изменению формы корпуса в кормовой оконечности, направленному на уменьшение величины момента корпусных ледовых сил, который значительно демпфирует поворот судна во льдах. С этой целью коэффициент полноты кормовой ветви ватерлинии в варианте 1191a уменьшен на 18,9%, а в варианте 11916 – на 21,4%, что приводит к уменьшению коэффициента общей полноты корпуса на 5,3% и 13% соответственно. Как видно из рис. 2, такие изменения сопровождаются постепенным заужением кормы, уходу от цилиндрической вставки и смещению в сторону носа наиболее широкого сечения корпуса.

Расчёты угловой скорости на установившейся циркуляции в сплошном льду и скорости прямолинейного движения, выполненные с использованием упомянутой методики, позволили получить результаты, приведённые на рис. 3 и в табл. 2.

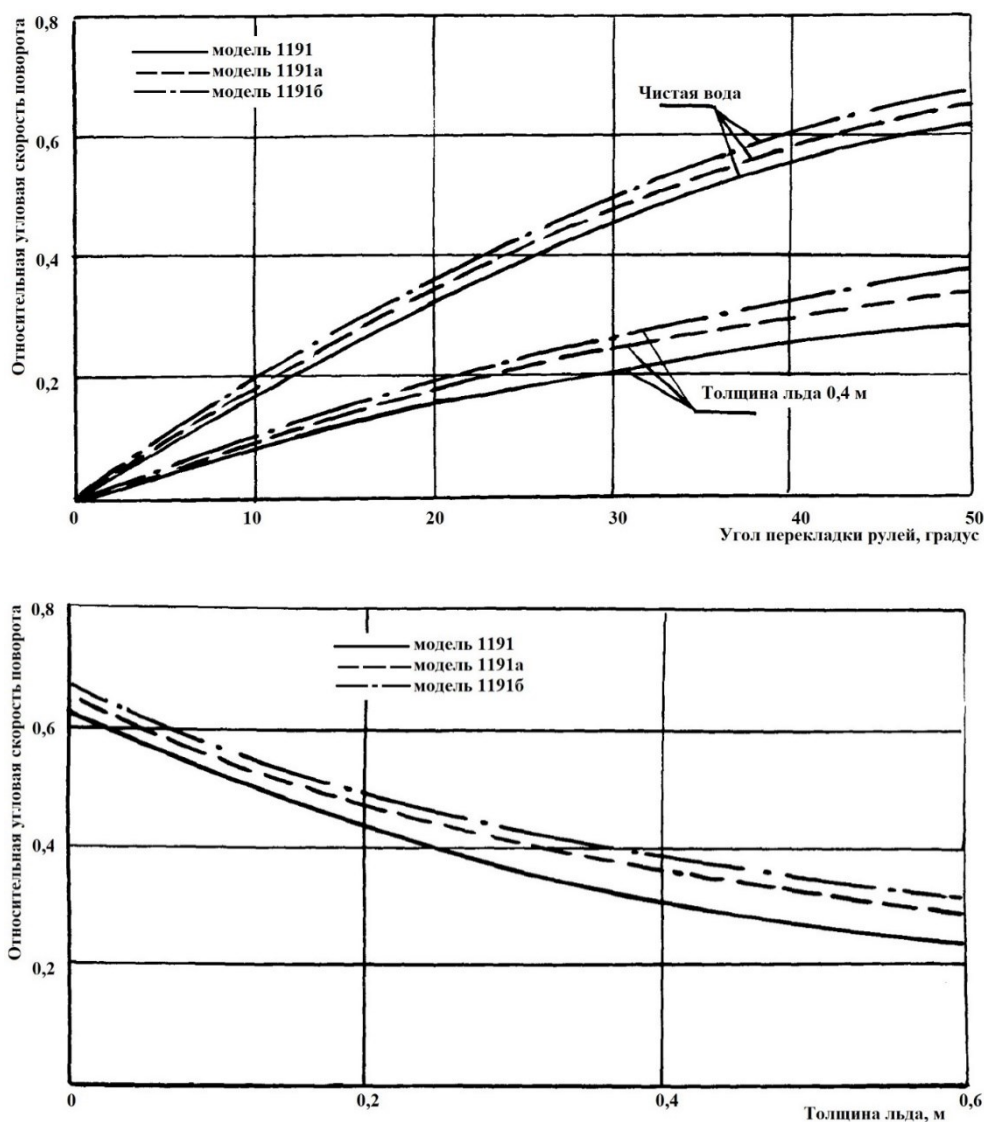


Рис. 3. Характеристики поворотливости моделей ледоколов

Изменения формы ватерлинии существенно сказались на поворотливости ледоколов во льду и на чистой воде. Как видно из рис. 3, относительная угловая скорость при переложенных «на борт» рулями во льду толщиной 0,4 м возросла у ледокола проекта 1191а на 17%, у ледокола проекта 11916 – на 26% по сравнению с базовым судном. На чистой воде это увеличение составляет соответственно 5 и 8%.

Таблица 2

Ходовые характеристики моделей ледоколов

Толщина льда, м	Скорость движения модели ледокола в сплошном льду, м/с		
	1191 (базовая)	1191а	11916
Чистая вода	7,5	7,7	7,8
0,2	4,5	4,8	5,1
0,4	2,8	3,2	3,4

Толщина льда, м	Скорость движения модели ледокола в сплошном льду, м/с		
	1191 (базовая)	1191a	11916
0,6	1,8	2,05	2,25
0,8	1,05	1,25	1,4
1,0	0,0	0,0	0,7

Анализируя данные табл. 2, следует отметить, что, несмотря на незначительное увеличение ширины корпуса, ходовые качества ледоколов моделей 1191a и 11916 улучшились. Можно полагать, что при сохранении практически неизменной формы носа уменьшение ледового сопротивления связано с сокращением зоны взаимодействия обломков льда с корпусом судна в кормовой оконечности.

Приведённые примеры показывают, что даже сравнительно небольшие изменения теоретического чертежа могут привести к заметному улучшению ходовых и маневренных качеств судна во льдах. Использование предложенной математической модели в сочетании с опытом и интуицией проектировщика позволит более обоснованно решать задачу оптимизации формы корпуса судна, предназначенного для эксплуатации в ледовых условиях. Такая оптимизация может быть осуществлена путём разработки (в рамках проектного задания) ряда вариантов теоретического чертежа и выполнения для каждого варианта расчётов ледовой ходкости и поворотливости.

Что касается целевого проектировочного расчёта оптимальных характеристик корпуса для заданных ледовых условий, то такая «прямая» задача в настоящее время пока не решена сколь-нибудь удовлетворительно. Поэтому под оптимизацией в данном случае понимается выбор наилучшего варианта теоретического чертежа судна из числа тех, для которых выполнены поверочные расчёты по указанной методике.

Следует отметить, что применение разработанной математической модели произвольного движения судна в ледовых условиях не ограничивается рассмотренными случаями движения судна на прямом курсе и установившейся циркуляции. С её помощью может быть выполнен анализ и разнообразных по характеру манёвров при нестационарном движении. Таким образом могут быть определены характеристики эволюционного движения, разгона, торможения судна и т.п.

При этом автор считает необходимым сделать принципиальное предупреждение потенциальным пользователям упомянутой методики. Она имеет полуэмпирическую природу на основе натурных и экспериментальных данных ледовых испытаний ограниченной группы речных судов с традиционными обводами и движительно-рулевыми комплексами (ДРК). Экстраполяция этой методики на суда с иным формообразованием и типами ДРК, наверняка, будет сопровождаться ухудшением адекватности результата расчётов и пониженной оправдываемостью прогноза ледовых качеств проектируемых судов вплоть до его полной неприемлемости. В этих случаях можно рекомендовать применение САЕ-технологий для решения подобных задач [16]. Значительная ресурсозатратность САЕ-испытаний потенциального флота ледового плавания оправдывается высоким уровнем адекватности и наглядности моделирования при универсальности этого метода.

Заключение

Исследованное судно стало реализацией экспериментального проекта в речном ледоколостроении, суть которого – принципиальный уход от традиционных ледокольных обводов корпуса, проверенных «хорошей ледовой практикой». В качестве положительного результата этого эксперимента можно отметить высокий уровень критерия «ледопроеходимость/осадка» у данного судна, что сохраняет группировку ледоколов проекта 1191 в штате «Росморпорта». При этом его относительная ледовая ходкость по сравнению с предыдущим проектом ледоколов

(1105) не была улучшена, а ледовая маневренность значительно ухудшена. В связи с «истощением» ресурса этих ледоколов в настоящее время обострилась проблема обновления ледокольного флота для ВВП и мелководных морских районов РФ. Критический анализ накопленного опыта должен стать основой разработки перспективных проектов речных ледокольных средств.

Список литературы

1. Лобанов, В. А. (2023). Ледовый паспорт речного ледокола: ходкость. Научные проблемы водного транспорта, (76), 219-228. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi76.390>
2. Лобанов, В. А. (2024). Ледовый паспорт речного ледокола: маневренность. Научные проблемы водного транспорта, (78), 169-177. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi78.438>
3. Лобанов, В. А. (2024). Ледовый паспорт речного ледокола: винтеризация и реконструкция. Научные проблемы водного транспорта, (81), 193-201. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi81.544>
4. Лобанов, В. А., Тихонов, В. И., Уртминцев, Ю. Н. (2025). Ледовый паспорт речного ледокола: особые работы. Научные проблемы водного транспорта, (85), 191-197. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi85.628>
5. Ледовый паспорт ледокола проекта 1191. – Отчёт по теме НИР. Тронин В.А. – Горький, ГИИВТ, 1986. – 32 с.
6. Тронин В.А. Повышение безопасности и эффективности ледового плавания судов на внутренних водных путях: диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук: специальность 05.22.16 – Судовождение / Горький, 1990. – 414 с.
7. Серийные речные суда. Пассажирские суда; сухогрузные теплоходы и танкеры; толкачи, буксиры; баржи; прочие суда. Т. 8, ЦБНТИ Минречфлота. – М.: Транспорт, 1987. – 230 с.
8. Справочник по серийным речным судам. Пассажирские суда; сухогрузные теплоходы и танкеры; толкачи, буксиры; баржи; прочие суда. Т. 7, ЦБНТИ Минречфлота. – М.: Транспорт, 1981. – 232 с.
9. Стратегия развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 29 февраля 2016 г. № 327-р. URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/8910>
10. Дрейбанд Д.В., Коршунов Д.А., Ничипорук А.О. Развитие инфраструктуры внутреннего водного транспорта: стратегические задачи, проблемы и перспективы // Научные проблемы водного транспорта, №74(1), 2023. – с. 96-104, DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi74.347>
11. Веселов Г.В., Кузмичев И.К., Минеев В.И., Новиков А.В. Обновление речного флота в условиях дефицита инвестиций // Научные проблемы водного транспорта, №61(2019), 2019. – с. 90-96. URL: <http://journal.vsuwt.ru/index.php/jwt/issue/view/4>
12. Тронин В.А. Результаты натурных испытаний маневренных характеристик речных ледоколов. - Тр./ГИИВТ, вып. 90. – М.: Транспорт, 1968, с. 72-77.
13. Тронин В.А., Пушкарев Л.В. Управление речными судами при плавании в ледовых условиях. - М.; Транспорт, 1973. – 112 с.
14. Тронин В.А., Сандаков Ю.А. Характеристики ледовой ходкости и маневренности ледокольных и транспортных судов. – Проблемы Арктики и Антарктики, вып. 50. - Л.: Гидрометеиздат, 1977, с. 105-109.
15. Тронин В.А. Определение ледовых усилий, действующих на корпус судна при криволинейном движении. – Тр./ГИИВТ, вып. 234, – Горький, 1988, с. 3-91.
16. Теоретические основы обеспечения безопасности судовождения на внутренних водных путях: монография / А.Н. Клементьев, И.К. Кузьмичёв, В.А. Лобанов [и др.]; под. ред. И.К. Кузьмичёва. – Нижний Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2020. – 124 с. – ISBN 978-5901722-73-2. – Текст: непосредственный.

References

1. Lobanov, V. A. (2023). Ledovyj pasport rechnogo ledokola: hodkost'. Nauchnye problemy vodnogo transporta, (76), 219-228. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi76.390>
2. Lobanov, V. A. (2024). Ledovyj pasport rechnogo ledokola: manevrennost'. Nauchnye problemy vodnogo transporta, (78), 169-177. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi78.438>
3. Lobanov, V. A. (2024). Ledovyj pasport rechnogo ledokola: vinterizaciya i rekonstrukciya. Nauchnye problemy vodnogo transporta, (81), 193-201. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi81.544>

4. Lobanov, V. A., Tikhonov V. I., Urtmintsev, Y.N. (2025). Ledovyy pasport rechnogo ledokola: osobyе raboty. Nauchnye problemy vodnogo transporta, (85), 191-197. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi85.628>
5. Ledovyy pasport ledokola proekta 1191. – Otchyot po teme NIR. Tronin V.A. – Gor'kij, GIIVT, 1986. – 32 s.
6. Tronin V.A. Povyshenie bezopasnosti i effektivnosti ledovogo plavaniya sudov na vnutrennih vodnyh putyakh: dissertaciya na soiskanie uchyonoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk: special'nost' 05.22.16 – Sudovozhdenie / Gor'kij, 1990. – 414 s.
7. Serijnye rechnye suda. Passazhirskie suda; suhogruzye teplohody i tankery; tolkachi, buksiry; barzhi; prochie suda. T. 8, CBNTI Minrechflota. – M.: Transport, 1987. – 230 s.
8. Spravochnik po serijnym rechnym sudam. Passazhirskie suda; suhogruzye teplohody i tankery; tolkachi, buksiry; barzhi; prochie suda. T. 7, CBNTI Minrechflota. – M.: Transport, 1981. – 232 s.
9. Strategiya razvitiya vnutrennego vodnogo transporta Rossijskoj Federacii na period do 2030 goda, utverzhennaya rasporyazheniem Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 29 fevralya 2016 g. № 327-r. URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/8910>
10. Drejband D.V., Korshunov D.A., Nichiporuk A.O. Razvitie infrastruktury vnutrennego vodnogo transporta: strategicheskie zadachi, problemy i perspektivy // Nauchnye problemy vodnogo transporta, №74(1), 2023. – s. 96-104, DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi74.347>
11. Veselov G.V., Kuzmichev I.K., Mineev V.I., Novikov A.V. Obnovlenie rechnogo flota v usloviyah deficita investicij // Nauchnye problemy vodnogo transporta, №61(2019), 2019. – s. 90-96. URL: <http://journal.vsuwt.ru/index.php/jwt/issue/view/4>
12. Tronin V.A. Rezul'taty naturnyh ispytanij manevrennyh harakteristik rechnyh ledokolov. – Tr./GIIVT, vyp. 90. – M.: Transport, 1968, s. 72-77.
13. Tronin V.A., Pushkarev L.V. Upravlenie rechnymi sudami pri plavanii v ledovyh usloviyah. – M.; Transport, 1973. – 112 s.
14. Tronin V.A., Sandakov YU.A. Harakteristiki ledovoj hodkosti i manevrennosti ledokol'nyh i transportnyh sudov. – Problemy Arktiki i Antarktiki, vyp. 50. - L.: Gidrometeoizdat, 1977, s. 105-109.
15. Tronin V.A. Opredelenie ledovyh usilij, dejstvuyushchih na korpus sudna pri krivoliniyem dvizhenii. – Tr./GIIVT, vyp. 234, – Gor'kij, 1988, s. 3-91.
16. Teoreticheskie osnovy obespecheniya bezopasnosti sudovozhdeniya na vnutrennih vodnyh putyakh: monografiya / A.N. Klement'ev, I.K. Kuz'michyov, V.A. Lobanov [i dr.]; pod. red. I.K. Kuz'michyova. – Nizhnyj Novgorod: Izd-vo FGBOU VO «VGUVT», 2020. – 124 s. – ISBN 978-5901722-73-2. – Tekst: neposredstvennyj.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Лобанов Василий Алексеевич, профессор кафедры Судовождения и безопасности судоходства, доцент, д.т.н., кафедра Судовождения и безопасности судоходства, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603950, Россия, Нижний Новгород, Нестерова 5, e-mail: lobbas@mail.ru; тел: +7 910 388 56 33

Vasily A Lobanov, Professor of department of Navigation and safety of navigation, associate professor, Dr. Sci. Tech., department of Navigation and safety of navigation, Volga State University of Water Transport (FSFEI HE VSUWT), 603950, Russia, Nizhny Novgorod, Nesterova 5

Тихонов Вадим Иванович, профессор кафедры Судовождения и безопасности судоходства, доцент, д.т.н., кафедра Судовождения и безопасности судоходства, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603950, Россия, Нижний Новгород, Нестерова 5, e-mail: vitnn12@mail.ru

Vadim I Tikhonov, Professor of department of Navigation and safety of navigation, associate professor, Dr. Sci. Tech., department of Navigation and safety of navigation, Volga State University of Water Transport (FSFEI HE VSUWT), 603950, Russia, Nizhny Novgorod, Nesterova 5

Статья поступила в редакцию 19.12.2025; принята к публикации 22.01.2026; опубликована онлайн 20.03.2026. Received 19.12.2025; published online 20.03.2026.

УДК 656.6

DOI: 10.37890/jwt.vi86.691

Анализ основополагающих трудов и перспективных направлений исследований в сфере линейного судоходства

К.Г. Тюленев¹

ORCID: 0000-0001-7540-4323

А.О. Ничипорук²

ORCID: 0000-0002-7763-2829

¹*ООО «Транспортные системы», г. Москва, Россия*

²*Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия*

Аннотация. В работе выполнено обзорное исследование, посвященное комплексному изучению фундаментальных трудов в области развития линейного судоходства, определению базовых направлений, по которым производились и в настоящее время осуществляется исследовательская деятельность российских и зарубежных ученых. Проанализировано множество источников, на основании которых обоснована востребованность формирования дополнительных актуализированных подходов организационно-технологического обеспечения мультимодальных перевозок с учетом действующих условий глобализации мировой экономики, ограничений пропускной способности транспортной сети, тенденций цифровой трансформации логистических цепочек. В частности, существенным значением в современных условиях обладает совершенствование подходов аналитического сопровождения принятия решений по выбору оптимальных транспортно-технологических схем мультимодальных перевозок в сети маршрутов международных транспортных коридоров, обеспечивающих создание и развитие цифровых платформенных решений.

Ключевые слова: водный транспорт, линейное судоходство, мультимодальные перевозки, организационные, технологические, технические аспекты, цифровизация.

Analysis of fundamental investigation and prospective research areas in liner shipping

Kirill G. Tulenev¹

ORCID: 0000-0001-7540-4323

Andrei O. Nichiporuk²

ORCID: 0000-0002-7763-2829

¹*Transport Systems LLC, Moscow, Russia*

²*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

Abstract. The represented review contains a comprehensive analysis of fundamental researches on the development of liner shipping, identifying key areas of past and present research by Russian and international scientists. Many reference source were investigated, substantiating the requirement for additional updated approaches to organizational and technological support for multimodal transportation, taking into account the current terms and conditions of globalization, limits of transport network capacity, trends toward digital transformation of supply chains being key factors in liner shipping industry. In particular, improving approaches to analytical support for decision-making regarding the selection of optimal transport and technological schemes of multimodal transportation within the network of international transport corridors supports the development of digital platform solutions, significant importance in supply chains integration.

Keywords: water transport, liner shipping, multimodal transportation, organizational, technological, technical aspects, digitalization.

Введение

Динамичное перераспределение грузопотоков между крупнейшими производственными кластерами и потребительскими рынками в условиях санкционного давления оказало существенное влияние на требования к качеству организации международных мультимодальных перевозок. Вследствие этого повышение эффективности управления водным транспортом, представляющего собой ключевой элемент транспортно-технологических схем (ТТС) трансконтинентальных перевозок, становится особенно значимой задачей.

Применение ТТС мультимодальных перевозок на основе водного транспорта в современных условиях предусматривает информационное взаимодействие участников транспортного процесса. Выполнение мультимодальной перевозки в едином цифровом пространстве требует наличия средств технологической, информационной и коммерческой интеграции участников ТТС, обеспечивающих реализацию ряда задач, представленных на рис. 1.

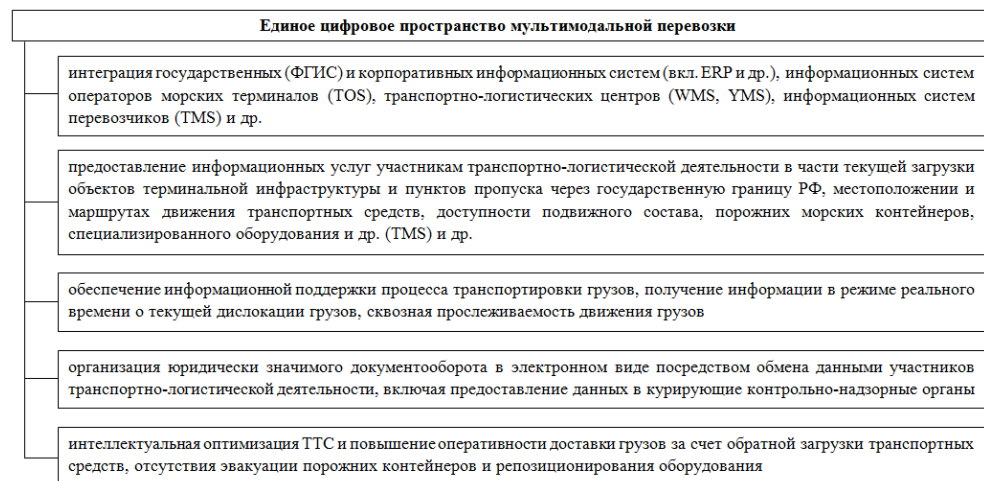


Рис. 1. Задачи, реализуемые в рамках единого цифрового пространства при мультимодальных перевозках

Для реализации указанных задач цифровой трансформации ТТС мультимодальных перевозок на основе водного транспорта требуется комплексное использование научного потенциала, сформировавшего базис развития национальной транспортной отрасли в части эксплуатации судоходных линий.

Использование основополагающих научных исследований представляется необходимым для разработки актуальных подходов, методов и моделей организации работы водного транспорта, соответствующих присутствующим задачам и текущим условиям эксплуатации водного транспорта в едином информационном пространстве.

Целью данного исследования является обзор фундаментальных работ в сфере линейного судоходства и определение перспективных научных направлений.

Методы

При обработке материала использовались системный и комплексный подходы к анализу публикаций по обозначенной тематике, размещенных в открытом доступе.

Оценку современного состояния, сложившихся актуальных проблем в области логистики и основных направлений ее развития на водном транспорте авторы проводили по следующему алгоритму:

1. Подбор научных публикаций, различных общедоступных источников отраслевой направленности. В качестве базовых изданий авторами выбраны отраслевые многопрофильные журналы, такие как «Научные проблемы водного транспорта», «Морские интеллектуальные технологии», «Транспортное дело России», материалы международных и всероссийских научно-промышленных и методических форумов и конференций, монографические исследования ученых-транспортников.

2. Обобщение направлений развития исследований российских ученых в области транспортной логистики в привязке к водному транспорту.

3. Проведение общего анализа и краткого обзора фундаментальных работ, связанных с предметом исследования (линейное судоходство, мультимодальные перевозки с применением водного транспорта). Структурирование, систематизация и классификация рассмотренных исследований.

4. Обобщение результатов анализа, приведение рассмотренных и изученных источников в упорядоченном, сконцентрированном по направлениям и областям исследований (различным аспектам) виде.

5. Формулирование выводов относительно направлений дальнейших исследований, особенности их проведения, наиболее актуальных проблем в области линейного судоходства, ТТС мультимодальных перевозок на основе водного транспорта.

Результаты

Вопросам управления судоходством при взаимодействии с объектами портовой инфраструктуры и наземными видами транспорта посвящены работы многих российских и зарубежных исследователей.

Среди зарубежных ученых, оказавших значительное влияние на развитие теории и практики деятельности морских контейнерных линий, следует особо отметить следующих специалистов, как D. Ronen, B. J. Powell, A. N. Perakis, K. Fagerholt, R. Agarwal, E. Ozlem, M. Sigurt, N. Ulstein, M.W. Andersen, M.G. Karlaftis, Q. Meng, M. Catalani. Вопросы управления работой морских портов, терминалов и транспортных сетей рассматривались в работах J. Bird, A. Beresford, J. Woxenius, G. Gujar, C. Caballini, M. Matthee, C. Macharis, T. Notteboom, S. Pettit, J.-P. Rodrigue, V. Roso, B. Slack и др. [1]

Теоретические основы управления водным транспортом были сформированы в работах ведущих отечественных ученых В.Г. Бакаева, В.В. Звонкова, А.Д. Ирхина, И.А. Сергеева, А.А. Союзова и развиты в исследованиях В.З. Ананьиной, Л.Д. Ветренко, Е.Н. Воеводского, Н.Н. Громова, Я.Б. Канторовича, В.И. Краева, Ю.К. Лехана, В.В. Петровского, Б.Я. Рогинского, В.И. Савина, В.И. Снопкова, Н.С. Ускова, А.С. Фролова, других ученых и специалистов [1].

Необходимо отметить, что теоретическим вопросам совершенствования контейнерных перевозок грузов в целом уделялось значительное внимание в работах, выполненных ИКТП, ЦНИИ МПС, Союзморниипроект, ЦНИИЭВТ, ЦНИИМФ и других ведущих научных организациях и институтах [1].

Существенный вклад в формирование транспортно-технологических систем морских перевозок на базе доставки укрупненных грузовых единиц от двери до двери был внесен Э.А. Гагарским [2]. В частности, результаты исследования «Технология транспортировки и перегрузки грузов в смешанных и комбинированных сообщениях» (ведущая организация – ФГУП НЦКТП Минтранса России) позволили рационализировать подходы формирования гармонизированной транспортной системы в части наиболее трудоемких, с позиций транспорта, тарных и штучных (генеральных) грузов.

Решения других эксплуатационных задач судоходства, включая обоснования грузоподъемности и скорости линейных судов, установления параметров судоходных линий в взаимосвязке с уровнем добавленной стоимости транспортируемых грузов, объемов грузопотоков на конференциальных линиях в условиях ограниченной информации были рассмотрены в трудах В.П. Капитанова, М.А. Верхивкера, Л.А. Четверкина

Моделирование транспортных систем на основе взаимодействия водного и железнодорожного транспорта, создавшее основы последующего развития перевозок грузов в прямом смешанном железнодорожно-водном сообщении (ПСЖВС) рассматривались в работах В.А. Персианова, С.В. Милославской, Н.С. Ускова

Базис научных подходов управления линейным судоходством, затрагивающих планирование деятельности флота в первичный период внедрению АСУ на морском транспорте представлено работами таких советских ученых, как Л.И. Бажан, А.В. Блинов, Л.Д. Ветренко, Г.Е. Гуревич, Д.К. Зотов, В.И. Коган, Д.М. Козлов, И.А. Лапкина [1].

Вопросы коммерческого обеспечения перевозочных процессов, оптимизации контейнерных перевозок в единой транспортной системе, управления грузопотоками в условиях неопределенности на примере водного транспорта в работах Э.Л. Лимонова, С.Б. Лебедева и В.В. Шутенко.

Следует подчеркнуть, что отечественная научная школа исследует проблемы формирования и организации эффективной контейнерной системы распределения грузов с периода становления универсального контейнера как признанной в мировом масштабе транспортной единицы, применяемой при перевозке генеральных грузов. Значительный вклад в комплексное развитие национальной системы контейнерных перевозок внесли работы таких ученых, как М.Д. Амусин, В.С. Бубякин, А.А. Булов, В.К. Калачев, В.И. Краев, С.М. Пьяных, В.И. Савин, В.Ф. Сиротский, А.Е. Суколенов, И.П. Фадеев [1]. Работы указанных авторов формируют фундаментальные положения в области организации и технологии перевозки контейнерных грузов морскими и речными судами различных конструкций и типов. В них также определены общие требования к организации и технологии перегрузки универсальных контейнеров в морских и речных портах с применением различных сочетаний портового и судового перегрузочного оборудования.

На рубеже 2000-х годов научные подходы развития линейного судоходства стало необходимым рассматривать в том числе с позиции расширения контейнеризации грузопотоков, усиления интеграции участников ТТС мультимодальных перевозок, выстраивания глобальных цепочек поставок на основе ключевых направлений судоходов.

Методологические подходы к оптимальному планированию внутрисистемного взаимодействия портов и линейного судоходства, технологии и организация перегрузочного процесса объектов терминальной инфраструктуры, вопросы повышения эффективности функционирования контейнерных портов в новых условиях экономической деятельности были рассмотрены в работах А.Л. Степанова [3].

В трудах Я.Я. Эглита представлен анализ экономической эффективности функционирования контейнерной транспортно-технологической системы, эффективности мультимодальных перевозок, осуществляется математическое моделирование функционирования транспортной компании, приводится методика анализа эффективности работы транспортно-логистического холдинга, сформирован моделирующий алгоритм функционирования контейнерной транспортно-технологической системы [4].

Исследованию вопросов функционирования сложных транспортных систем, в том числе портов и звеньев «флот – порт» с учетом проводимых в стране экономических реформ посвящены работы А.В. Кириченко, в которых отражаются принципы

эксплуатации водного транспорта с позиции грузовладельца и его взаимодействия с объектами терминальной инфраструктуры [5,6].

Характер эволюции магистрально-фидерных транспортно-логистических систем, создание интегрированной системы эксплуатационных и экономических показателей, отражающих общетранспортные и внутрисистемные процессы контейнерных терминалов, генезис моделей развития портов современной транспортной науке, классификация и функциональное моделирование эшелонированных контейнерных терминалов рассмотрены в работах А.Л. Кузнецова [7,8].

Особое значение представляют труды И.А. Русинова, И.А. Гавриловой, А.Г. Нелогова, отражающие вопросы регулирования линейного судоходства на основе анализа положений конвенции ООН о кодексе поведения линейных конференций, а также опыт Японии политику ЕС, КНР, США в области линейного судоходства [9].

В работах А.В. Галина сформированы задачи проектирования контейнерной линии в современной транспортной системе России, произведен аналитический обзор методов маршрутизации судов в линейном контейнерном сервисе при сбое его работы, показана классификация контейнерных портов на основе судоходных линий, модель оптимизации линейных маршрутов на основе генетического алгоритма, обоснован унифицированный метод для маршрутизации судов при сбое работы линейного контейнерного сервиса [10].

Вопросами качества и эффективности контейнерных перевозок грузов, в том числе на внутреннем водном транспорте, занимались ученые В.П. Зачесов, В.Л. Зюзин, В.Н. Костров, В.И. Кожухарь, И.К. Кузьмичев, А.А. Луговец, А.Г. Малышкин, Н.С. Отделкин, Ю.И. Платов, В.В. Попов, И.А. Рагулин, А.Н. Ситнов, А.В. Степанец, А.И. Телегин, М.Ф. Трихунков, Ю.Н. Уртминцев, А.А. Хохлов, В.В. Цверов и др. [1, 11, 12].

В том числе были исследованы вопросы создания мультимодальных грузовых терминалов в речных портах (В.Н. Костров, Д.С. Ермаков), развитие мультимодальных технологий на основе использования типов судов внутреннего плавания (Н.А. Ефремов, В.Н. Костров), сформирована концепция развития и организации комбинированных (смешанных) перевозок на внутреннем водном транспорте в современных условиях (В.Н. Костров, А.О. Ничипорук, С.В. Костров, Д.Н. Сухарев), определены основные направления развития логистики на внутреннем водном транспорте (О.Л. Домнина, В.Н. Костров, А.О. Ничипорук).

Представленные исследования обладают основополагающим значением для развития линейного судоходства в транспортном комплексе РФ.

В соответствии с приведенными фундаментальными трудами, а также современными тенденциями развития внешней торговли, под линейным судоходством понимается форма организации перевозок, при которой перевозчик организует регулярное движение судов по объявленному расписанию и обеспечивает доставку грузов различной партионности, принадлежащих неопределенному кругу грузоотправителей, используя стандартные условия договора морской перевозки и единые тарифы.

Характерные для оформленной грузовой линии признаки представлены на рис. 2.

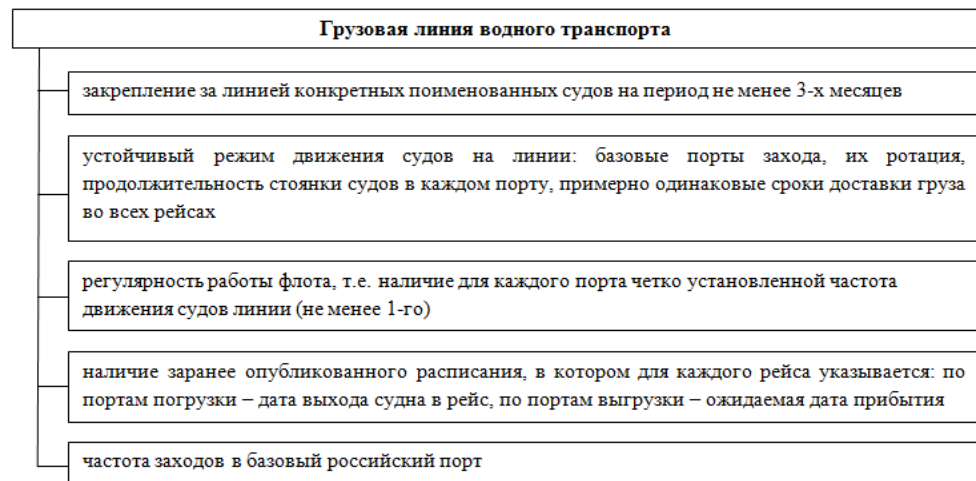


Рис. 2. Основные признаки грузовой линии на водном транспорте

Регулярные перевозки массовых грузов (наливных, навалочных, лесных, зерновых, удобрений) по установленному графику на основе чартера на несколько последовательных рейсов или долгосрочных фрахтовых соглашений между фрахтователем и судовладельцем к линейному судоходству не относятся и регистрации в качестве такового не подлежат.

Вместе с тем, существующие тенденции стремительной цифровой трансформации транспортного комплекса РФ требуют дальнейшего развития научных исследований в данной области.

Согласно Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года системообразующую основу национальной политики составляет решение долгосрочных задач, в числе которых обеспечение сбалансированного роста конкурентоспособности, доступности и качества услуг внутреннего водного транспорта.

В соответствии с приведенными целями, представляется целесообразным осуществлять в настоящее время создание и внедрение Национальной цифровой платформы ГосЛог, выполняющей функции аналитического сопровождения организации мультимодальных перевозок с участками линейного судоходства и наземного транспортирования.

Обсуждение

Для выработки предложений по совершенствованию нормативной технической базы, методических, аналитических и информационных материалов, подготовки рекомендаций по внедрению актуальных практик эксплуатации линейного судоходства представляется востребованным расширение исследований в области организационно-технологического обеспечения линейного судоходства, что будет содействовать решению следующих задач:

– формирование предложений по оптимизации работы водного транспорта путем развития формализованных ТТС линейных мультимодальных перевозок, являющихся базой распределения грузопотоков между наземными видами транспорта и водным транспортом в соответствии с Федеральным проектом «Транспортно-логистические центры».

– участие в процессе разработки единых национальных стандартов, обеспечивающих комплексную цифровую трансформацию ТТС мультимодальных

перевозок на основе водного транспорта в соответствии с ведомственным проектом «Цифровой транспорт и логистика».

– разработка предложений по совершенствованию комплекса мер государственной поддержки проектов внутреннего водного транспорта с использованием механизма государственно-частного партнерства, концессий и стимулирование дополнительных частных инвестиций. Решение задачи будет способствовать созданию конкурентоспособных международных транспортных коридоров, проходящих по территории РФ, росту внешнеторговых и транзитных перевозок по внутренним водным путям, в том числе увеличению контейнеризации грузопотоков.

– усиление интеграции участников цифрового перевозочного процесса для создания единой информационной среды, включая разработку предложений по внедрению системы единых электронных документов, сервисов «единого окна», интеграции с цифровыми транспортно-логистическими платформами дружественных государств.

– Развитие исследований в области организационно-технологического обеспечения линейных мультимодальных перевозок позволит содействовать реализации стратегических преимуществ водного транспорта (оптимальная себестоимость перевозки, экологичность, энергоэффективность и безопасность), снижению удельных транспортных издержек в цене готовой продукции, росту инвестиционной привлекательности и конкурентоспособности, усилению роли экспортных и транзитных перевозок при использовании внутреннего водного транспорта.

Заключение

Проведенный в данной работе обзор основных направлений исследований в области линейного судоходства определяет перспективные направления разработок в данной сфере: использование современных цифровых технологий для анализа информации и принятия оптимальных решений в кратчайшие сроки с минимальными издержками на основе доступа к аналитической информации по реализованным перевозкам, выполненным участниками ТТС; действующие в текущее время маршруты и расписания перевозки по всем видам транспорта ТТС мультимодальной перевозки; условия перевозки различными видами транспорта по индикативным и наиболее востребованным маршрутам, что позволяет оценить варианты способов доставки грузов, полученных на основе многокритериального отбора, и принять обоснованное решение о выборе оптимального варианта ТТС линейной мультимодальной перевозки.

Список литературы

1. Телегин, А.И. Качество и эффективность перевозок сухогрузов. Методы и результаты исследований за 1970-2000 годы : монография / А.И. Телегин [и др.]. – Н. Новгород: ВГАВТ, 2002. – 299 с.
2. Гагарский, Э.А. Транспортно-технологические системы – основа развития транспорта/ Э.А. Гагарский // Морские вести России. – 2012. – № 4. – С.8-9.
3. Степанов, А.Л. Портовые технологии в транспортной логистике / А.Л. Степанов // Логистика: современные тенденции развития : материалы XIV Международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, 2015. – С. 342-345.
4. Эглит, Я.Я. Контейнерная транспортно-технологическая система / Я.Я. Эглит, К.Я. Эглите, Ю.А. Соломатина, В.В. Шевченко // Эксплуатация морского транспорта. – 2022. – № 1 (102). – С. 15-21.

5. Изотов, О.А. Роль транспортно-логистических кластеров в формировании контейнерных коридоров перевозок сборных грузов / О.А. Изотов, А.Л. Кузнецов, Д.И. Головцов // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2020. – №2. – С. 127-136.
6. Кириченко, А.В. Обоснование исходных данных при моделировании вывоза контейнеров из порта на тыловой терминал с применением технологии «блок-трейн»/ А.В. Кириченко, М.О. Малыхин// Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О.Макарова. – 2015. – № 4 (32). – С. 22-30.
7. Кузнецов, А.Л. Моделирование развития портов / А.Л. Кузнецов, А.В. Галин // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – Т.1. – №3 (41). – С.176-182.
8. Кузнецов, А.Л. Технологическая трансформация универсальных причалов в малые контейнерные терминалы / А.Л. Кузнецов, А.В. Галин, С.С. Валькова, А.М. Сампиев // Транспортное дело России. – 2022. – № 2. – С. 243-249.
9. Русинов, И.А. Вопрос регулирования линейного судоходства на основе анализа положений конвенции ООН о кодексе поведения линейных конференций / И.А. Русинов, И.А. Гаврилова, А.Г. Нелогов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2016. – № 3(37). – С. 53-64. – DOI 10.21821/2309-5180-2016-7-3-53-64.
10. Галин, А.В. Задача проектирования контейнерной линии в современной транспортной системе России / А.В. Галин, П.С. Рудный // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2024. – Т. 16, № 1. – С. 64-73. – DOI 10.21821/2309-5180-2024-16-1-64-73.
11. Домнина, О.Л. Современное состояние, проблемы и основные направления развития логистики на водном транспорте / О.Л. Домнина, В.Н. Костров, А.О. Ничипорук // Научные проблемы водного транспорта : Вестник / ВГАВТ. – Н. Новгород, 2023. – Вып. 76. – С. 141-165.
12. Обеспечение качества и эффективности перевозок сухих грузов речным транспортом в современных условиях : монография / А.И. Телегин [и др.] ; под ред. А.И. Телегина. Нижний Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2020. – 132 с.

References

1. Telegin A.I. Kachestvo i ehffektivnost perevozk sukhogruzov. Metody i rezultaty issledovaniy za 1970-2000 gody : monografiya [*Quality and efficiency of dry cargo transportation. Methods and research results for 1970-2000: monograph*]. N. Novgorod: VГАVТ. 2002. 299 p. (In Russ).
2. Gagarskii E.A. Transportno-tekhnologicheskie sistemy – osnova razvitiya transporta [*Transport and technological systems - the basis for the development of transport*].Morskije vesti Rossii [Sea news of Russia]. 2012. No.4. Pp.8-9. (In Russ).
3. Stepanov A.L. Portovye tekhnologii v transportnoi logistike [*Port technologies in transport logistics*].Logistika: sovremennye tendentsii razvitiya : Materialy XIV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [*Logistics: modern development trends: Materials of the XIV International Scientific and Practical Conference*]. Sankt-Peterburg: Federalnoe gosudarstvennoe byudzhethnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Gosudarstvennyi universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. 2015. Pp. 342-345. (In Russ).
4. Ehglit YA.YA., Ehglite K.YA., Solomatina YU.A., Shevchenko V.V. Konteiner'naya transportno-tekhnologicheskaya sistema [*Container transport and technological system*].Ehkspluatatsiya morskogo transporta [*Operation of sea transport*]. 2022. No.1 (102). Pp. 15-21. (In Russ).
5. Izotov O.A., Kuznetsov A.L., Golovtsov D.I. Rol transportno-logisticheskikh klasterov v formirovani konteinernykh koridorov perevozk sbornykh gruzov [*The role of transport and logistics clusters in the formation of container corridors for the transportation of prefabricated goods*].Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [*Bulletin of Astrakhan State Technical University*]. 2020. No.2. Pp. 127-136. (In Russ).
6. Kirichenko A.V., Malykhin M.O. Obosnovanie iskhodnykh dannykh pri modelirovani vyvoza konteinerov iz porta na tylovoi terminal s primeneniem tekhnologii “blok-trein” [*Justification of initial data when modeling the export of containers from the port to the rear*

- terminal using the "block train" technology]. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O.Makarova [Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov]. 2015. No.4 (32). Pp. 22-30. (In Russ).
7. Kuznetsov A.L., Galin A.V. Modelirovanie razvitiya portov [Modeling of port development]. Marine intelligent technologies. 2018. Vol.1. No.3 (41). Pp.176-182. (In Russ).
 8. Kuznetsov A.L., Galin A.V., Valkova S.S., Sampiev A.M. Tekhnologicheskaya transformatsiya universalnykh prichalov v malye konteynernye terminaly [Technological transformation of universal berths into small container terminals]. Transportnoe delo Rossii [Transport business of Russia]. 2022. No. 2. Pp. 243-249. (In Russ).
 9. Rusinov I.A., Gavrilova I.A., Nelogov A.G. Vopros regulirovaniya lineinogo sudokhodstva na osnove analiza polozhenii konvetsii OON o kodekse povedeniya lineinykh konferentsii [The issue of regulation of linear shipping based on the analysis of the provisions of the UN Convention on the Code of Conduct for Linear Conferences]. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova [Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov]. 2016. No.3(37). Pp. 53-64. (In Russ). DOI 10.21821/2309-5180-2016-7-3-53-64.
 10. Галин, А.В. Задача проектирования контейнерной линии в современной транспортной системе России / А. В. Галин, П. С. Рудный // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2024. – Т. 16, № 1. – С. 64-73. – (In Russ). DOI 10.21821/2309-5180-2024-16-1-64-73.
 1. Galin A.V., Rudnyi P.S. Zadacha proektirovaniya kaonteynernoi linii v sovremennoi transportnoi sisteme Rossii [The task of designing a container line in the modern transport system of Russia/A.V. Galin, P.S. Rudny]. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova [Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov]. 2024. Vol.16. No.1. Pp. 64-73. (In Russ). DOI 10.21821/2309-5180-2024-16-1-64-73.
 11. Domnina O.L., Kostrov V.N., Nichiporuk A.O. Sovremennoe sostoyanie, problemy i osnovnye napravleniya razvitiya logistiki na vodnom transporte [Current state, problems and main directions of development of logistics in water transport]. Russian Journal of Water Transport. 2023. No.76. Pp. 141-165. (In Russ).
 12. Obespechenie kachestva i ehffektivnosti perevozok sukhikh gruzov rechnym transportom v sovremennykh usloviyakh : monografiya [Ensuring the quality and efficiency of dry cargo transportation by river transport in modern conditions: monograph] / A.I. Telegin [et al.]. Nizhny Novgorod: Izd-vo FGBOU VO «VGUVT», 2020. 132 p. (In Russ).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Тюленев Кирилл Геннадьевич, заместитель председателя Технического комитета по стандартизации ТК 490 «Логистика и управление цепями поставок», Росстандарта, генеральный директор ООО «Транспортные системы», Москва, 117556, Москва, ул. Фруктовая, 14, email: kirilltulenev@mail.ru

Ничипорук Андрей Олегович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры логистики и маркетинга, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, г.Нижний Новгород, ул.Нестерова, 5, e-mail: nichiporouk@rambler.ru

Kirill G. Tulenev, Deputy Chairman of the Technical Committee for Standardization TC 490 «Logistics and Supply Chain Management», Rosstandart, General Director of Transport Systems LLC, Moscow, 117556, Moscow, Fruktovalaya st., 14, email: kirilltulenev@mail.ru

Andrey O. Nichiporuk, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Logistics and Marketing, Volga State University of Water Transport, 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova str., 5, e-mail: nichiporouk@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 14.01.2026; принята к публикации 19.02.2026; опубликована онлайн 20.03.2026. Received 14.01.2026; published online 20.03.2026.

УДК 004.93

DOI: 10.37890/jwt.vi86.684

Технология контроля ледового покрова на основе семантической сегментации облака точек

И.К. Фомина

ORCID: 0000-0003-0999-3339

Е.А. Смирнов

ORCID: 0009-0007-7621-3140

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Контроль ледовой обстановки на реках, озерах и в прибрежных морских акваториях является критически важной задачей для обеспечения безопасности судоходства, оптимизации и продления навигации, а также функционирования портовой инфраструктуры в условиях сезонного ледостава. Особую актуальность технология приобретает в контексте развития арктических маршрутов, включая Северный морской путь, где динамика и прочность льда напрямую влияют на логистическую эффективность и безопасность плавания. В статье предложена технология инструментального мониторинга прочности и толщины льда с использованием мобильных лидар-сканеров и методов семантической сегментации облаков точек, позволяющая снизить операционные риски для водного транспорта и обеспечить своевременное принятие решений. Реализация ориентирована на профессиональных пользователей (экипажи судов, службы портов, администрации) и представлена в виде мобильного приложения, выполняющего вычисления локально с применением высокопроизводительных оптимизированных библиотек с ядрами на C/C++.

Ключевые слова: лидар, мобильное 3D-сканирование, облака точек, семантическая сегментация, ледовый покров, безопасность судоходства, продление навигации, Северный морской путь, мониторинг льда, толщина льда, point-in-polygon, OpenCV, NumPy, Shapely, Ultralytics, Open3D.

Technology for ice cover control based on semantic segmentation of a point cloud

Inga K. Fomina

ORCID: 0000-0003-0999-3339

Egor A. Smirnov

ORCID: 0009-0007-7621-3140

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia

Abstract. Monitoring the ice situation on rivers and reservoirs remains a challenging applied task for ensuring the safety of ice crossings, recreation areas, and ice fishing sites, as well as preventing natural and man-made disasters in regions with seasonal ice cover. This article proposes a technology for instrumental monitoring of ice strength using mobile lidar scanners and semantic segmentation methods for point clouds, which can help reduce risks to human life, water infrastructure, and the overall economy of the industry. The implementation is aimed at the mass user, in the form of a mobile application that performs calculations locally using high-performance libraries with C/C++ cores.

Keywords: lidar, mobile 3D scanning, point clouds, semantic segmentation, ice cover, polynya, ice thickness determination, point-in-polygon, OpenCV, NumPy, Shapely, Ultralytics, Open3D.

Введение

Глобальное изменение климата привело за последнее десятилетие к значительным изменениям в сроках ледостава, продолжительности и характеристиках ледового покрова. Эти изменения напрямую затрагивают гидрологический режим и хозяйственную деятельность, связанную с водным транспортом. Нестабильность ледовой обстановки создает значительные риски для безопасной эксплуатации судов, работы портов, а также повышает опасность ледовых заторов и наводнений в период ледохода. Для ключевых арктических маршрутов, таких как Северный морской путь, оперативный и точный контроль состояния льда становится фактором экономической и навигационной безопасности.

Существующие практики контроля прочности льда — визуальная оценка, бурение контрольных лунок, линейные измерения промером — субъективны, трудозатратны и небезопасны для исполнителя. Официальный мониторинг ледовой обстановки традиционно ведётся с применением дорогостоящих средств аэрофотосъёмки и радаров, что плохо масштабируется с оперативным контролем специалистами, работающими на судах водного транспорта. Параллельно, стремительное распространение мобильных устройств с технологией бортового лазерного дистанционного зондирования (LiDAR), делает актуальным создание безопасных, доступных и точных методов инструментального контроля, для отслеживания и создания трёхмерных карт процессов ледостава [1-3]. Контроль ледового покрова на основе семантической сегментации облаков точек, получаемых мобильным лидаром, с последующим расчётом толщины льда и отображением зон риска в пользовательском интерфейсе, позволяет адаптировать инфраструктуру водопользования и своевременно осуществлять меры по снижению рисков взаимодействия водных экосистем и транспорта.

Методы и материалы

Развитие мобильного лидар-сканирования позволяет формировать детальные облака точек локального участка льда с точностью, достаточной для геометрических построений в удобном для пользователя режиме. Для автоматизации анализа целесообразно применять модели семантической сегментации как непосредственно в 3D-облаке (PointNet/PointNet++, RandLA-Net, Sparse-U-Net на разреженных свёртках), так и в 2.5D-представлении (проекция на карту дальности/глубины с последующим переносом меток обратно в 3D). Ввиду ограничений по памяти и энергии мобильных устройств предлагается гибридный подход, сочетающий лёгкие 2D-сети и геометрические постобработки [4,5]. Такая структурная логика широко используется в прикладных задачах компьютерного зрения для отраслей транспорта и промышленности.

Особую остроту проблема оперативного контроля ледового покрова приобретает на судоходных путях с сезонным ледоставом, где риски наиболее велики, а требования к простоте и эффективности решений максимальны. К таким артериям относятся [1,2]:

1. Ключевые арктические маршруты (Северный морской путь). Здесь динамика льда крайне нестабильна из-за климатических изменений, а традиционные методы ледокольной проводки энергозатратны. Согласно исследованиям, мощность энергетической установки судна (N) на воздушной подушке, необходимой для резонансного разрушения льда, нелинейно растёт с увеличением его толщины: $N_{\text{сум}} = k \times (h_{\text{льда}})^\alpha$, где $\alpha > 1$. Это делает критически важным точное знание локальной толщины льда для планирования безопасного и экономичного маршрута.

2. Внутренние водные пути (сибирские реки Обь, Енисей, Лена) и припортовая инфраструктура. На этих объектах логистика зависит от короткой навигации, а ледовая разведка часто проводится устаревшими методами. Проблема усугубляется образованием торосов и промоин, создающих локальные зоны повышенной опасности для судов, не обладающих ледокольным классом.

Таким образом, для данных маршрутов необходимы простые и эффективные технологии, не требующие сложного оборудования и позволяющие проводить оценку непосредственно силами экипажей судов или портовых служб.

При резонансном методе разрушения лёд рассматривается как плавающая упругая пластина. Судно на воздушной подушке (СВП), двигаясь с критической (резонансной) скоростью, вызывает в этой пластине изгибно-гравитационные волны большой амплитуды, что приводит к разрушению льда при относительно малых энергозатратах.

Критическая скорость (V_{crit}) напрямую зависит от толщины льда (h). Упрощенная формула для ее оценки в случае тонкого льда имеет вид: $V_{crit} \approx \sqrt{g \times h}$, где g — ускорение свободного падения.

На рисунке 1 изображена зависимость суммарной мощности энергоустановки судна на воздушной подушке от толщины разрушаемого льда (резонансный метод). График иллюстрирует критический рост энергозатрат, что обосновывает необходимость точного измерения толщины льда h для планирования маршрута.

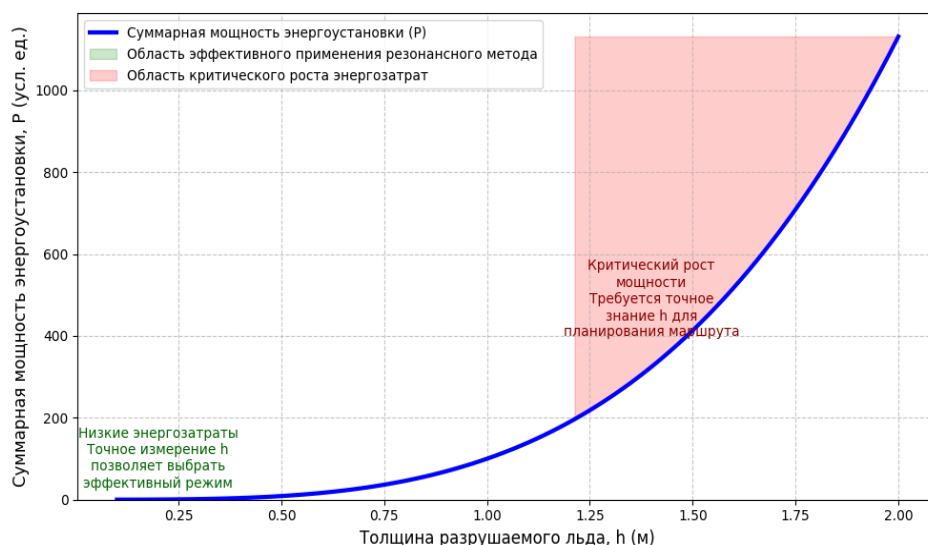


Рис. 1. Зависимость суммарной мощности энергоустановки судна на воздушной подушке от толщины разрушаемого льда (резонансный метод)

С помощью встроенных конструкций мобильной лидарной системы фиксируется пространственная информация, включающая интенсивность отражения лазерного сигнала (показатель I) и цветовые данные (c) с сопряжённой RGB камеры; положение и ориентация устройства в пространстве вычисляется встроенным модулем SLAM (Simultaneous Localization And Mapping); выполняется однократная внешняя и внутренняя калибровка для согласования системы координат.

Съёмка производится со стороны берега или моста с охватом кромки льда и, по возможности, открытой воды (польны/лунки), что обеспечивает привязку высотной отметки водной поверхности (рисунок 2).

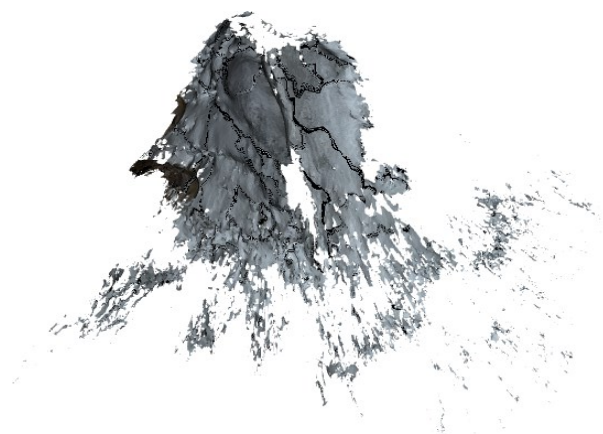


Рис. 2. Фронтальная съёмка льда технология 3s Scanner App

Семантическая сегментация, адаптированная к задаче анализа ледовой обстановки, выделяет объекты (например точке в 3Dпространстве) и присваивает семантическую метку (класс): «лёд», «вода», «снег» и др. в соответствии с их смысловой принадлежностью. Далее «почти двумерные» данные (2.5D) формируют маску сегментации, включающую дополнительную информацию о глубине/высоте. Что позволяет сгенерировать полные трехмерные (3D) данные с дополнительными признаками точек исходного облака, методом обучения с комбинированной функцией потерь. Для согласования результатов применяется CRF (Conditional Random Fields) постобработка для сглаживания и уточнения границ, на графе k - ближайших соседей (kNN). Опасные зоны (полыньи, промоины, разжижение льда) задаются как 2Dполигоны, программная реализация опирается на библиотеку Shapely (GEOS), корректно обрабатывающую граничные случаи и самопересечения [5-7]. Все шаги реализуются в векторизованном виде (NumPy) и/или через ускоренные C/C++-ядра (Open3D, OpenCV), что обеспечивает ускорение исполнения на порядки по сравнению с наивными Python-циклами.

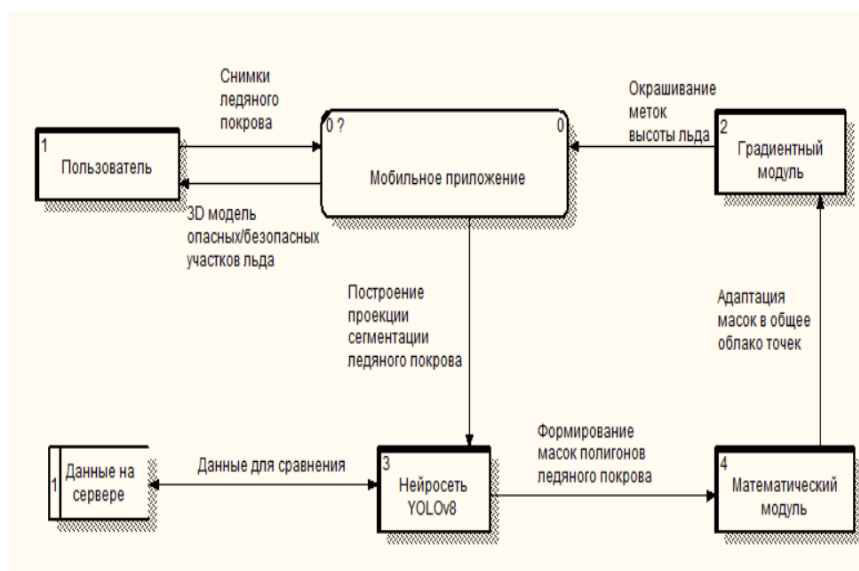


Рис. 3. Информационная система распознавания объектов ледостава

Разработанная информационная система (ИС) анализа ледяного покрова объединяет технологию компьютерного зрения (YOLOv8), геометрическую обработку изображений льда и его градиентное окрашивание, визуализирующее для пользователя опасные зоны на льду.

На рисунке 3 представлена диаграмма потока данных (DFD), описывающая процесс анализа снимков ледяного покрова с использованием мобильного приложения и разработанных вспомогательных модулей. Схема иллюстрирует последовательность обработки данных — от получения снимков до формирования 3D-модели опасных и безопасных участков льда. В соответствии принципа гидростатического равновесия для пресноводного льда и соотношения между надводной (10% объёма) и подводной частями льдины, полная толщина льда $H_{max} = H_{upwater}/0,1$ (м), что и используется в расчетах математического модуля.

Программно-аппаратная архитектура, разработанной ИС включает следующие этапы [8,9].

1. Сбор пространственных данных осуществляется с помощью мобильного приложения на платформах iOS/Android, управляющего сканированием и одновременной локализацией и построением карты SLAM. Нейросетевая модель YOLO v8, используя технологии глубокого обучения, выполняет первичную сегментацию на базе программных решений PyTorch, Lite, CoreML, NNAPI. Опционально включается 3Dветка для построения трехмерной модели сцены на основе результатов сегментации.

2. Математический модуль, проверяет принадлежность 3D – точек к полигонам опасных зон, в рамках пространственного анализа, используя библиотеки Shapely и GEOS. Цель данного модуля необходимость идентификации, точек находящиеся около заданного уровня высоты льда и определить попадают ли они в опасные зоны.

3. В рамках математического модуля реализован алгоритм вычисления локальной толщины ледяного покрова h_i на основе пространственного распределения точек, идентифицированных как принадлежащие опасной зоне (рисунок 4).

```

for height in height_levels:
    # Находим все точки меша на этой высоте в пределах маски
    points_in_mask = []
    for i in range(mesh.npoints):
        x, y, z = mesh.points[i]
        if abs(y - height) < 0.02 * (y_max - y_min):
            p = Point(x, z)
            for candidate in [shapely_geoms[i] for i in tree.query(p)]:
                for poly in get_all_polygons(candidate):
                    if poly.buffer(0.05).contains(p):
                        points_in_mask.append([x, y, z])
                        break

```

Рис. 4. Алгоритм определения принадлежности каждой точки маскам сегментации

4. Градиентный модуль визуализирует результаты анализа пространственных данных, в рамках пользовательского интерфейса UI, формируя тепловую карту риска («безопасно/с осторожностью/опасно») и выводит её на экран (рисунок 5). Тепловая карта отображает опасную красную зону, насыщенный синий цвет демонстрирует безопасную высоту и плотность льда.

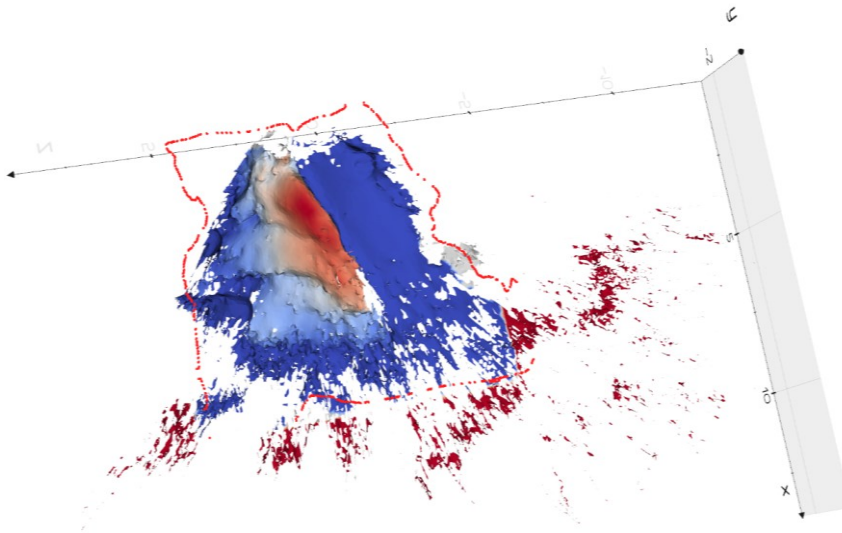


Рис. 5. Вид модели ледяного покрова после обработки

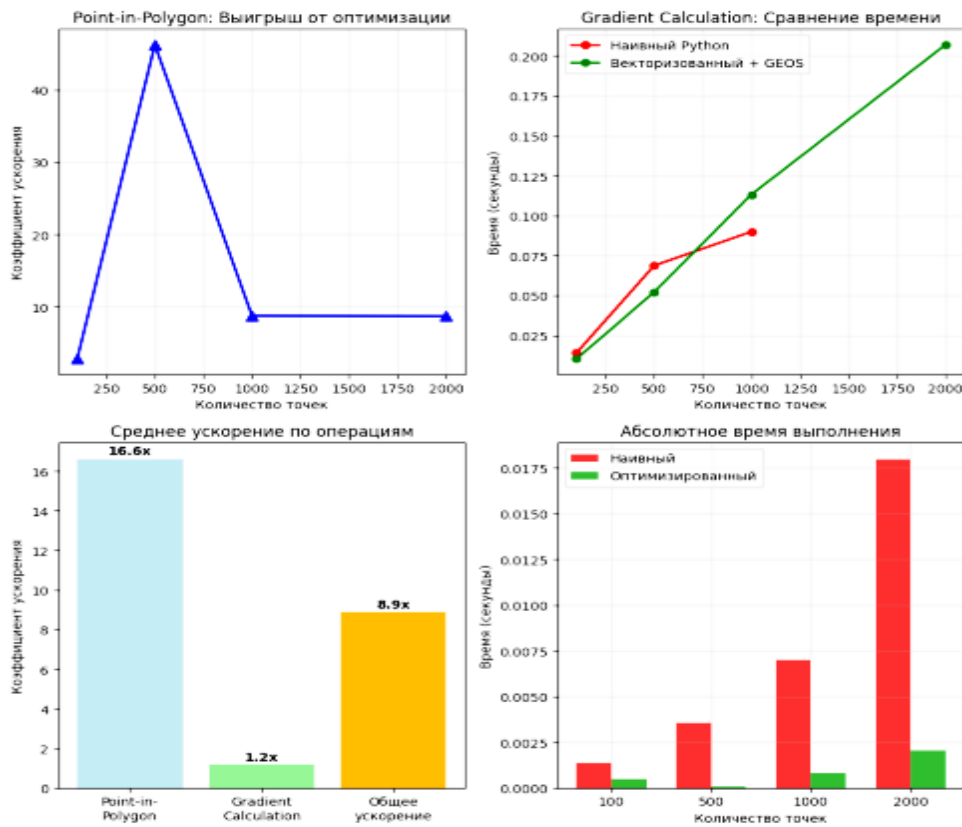


Рис. 6. Сравнительный анализ производительности подходов к решению задачи: наивный и реализованный в информационной системе

Результаты

В рамках разработанной системы, сформулированы следующие результаты:

1. Разработана практическая методология для оперативного контроля ледовой обстановки. Предложен и реализован подход, сочетающий мобильное LiDAR сканирование, семантическую сегментацию облаков точек (2.5D/3D) и графическую постобработку для анализа характеристик льда.

2. Создана работоспособная информационная система анализа ледяного покрова, формирующая визуальную, тепловую карту риска (безопасно, с осторожностью, опасно) для наглядного представления результатов конечным пользователям и муниципальным службам [10,11].

3. Достигнута высокая вычислительная эффективность, позволяющая за счёт векторизации и использования высокопроизводительных библиотек NumPy, OpenCV, GEOS, достигать повышение вычислительной эффективности вплоть до нескольких порядков относительно наивной интерпретации на Python, что позволяет работать без дискретной видеокарты на мобильном CPU/NeuralCore (рисунок 6). Благодаря оптимизации: система сохраняет работоспособность без дискретного графического ускорителя (GPU); обработка данных выполняется на встроенном CPU или Neural Core мобильных устройств, что критически важно для полевых сценариев применения. Таким образом, интеграция векторизованных операций и низкоуровневых ядер позволяет реализовать ресурсоёмкие алгоритмы компьютерного зрения и пространственного анализа в условиях ограниченных вычислительных мощностей мобильных устройств.

4. Практическая значимость разработки подтверждена для судоходства, внутренних водных путей и портов, предоставляет возможность оперативно выявлять опасные зоны (торосы, промоины разжижение) без сложного оборудования. Доказана техническая реализация и приведены визуальные результаты.

5. Дальнейшие направления развития и совершенствования технологии определены и включают увеличение обучающих данных для разных погодных условий и последующее дообучение сетей.

Заключение

В результате проведенного исследования разработано практически применимое программно-аппаратное решение, которое позволяет осуществлять быстрый и точный анализ ледовой обстановки, визуализировать зоны риска для повышения навигационной и экономической безопасности. Цели, поставленные в исследовании достигнуты:

1. Решение представляет собой готовое к использованию приложение, не требующее сложного оборудования или специально обученного персонала.

2. Доступность эксплуатации программно-аппаратной информационной системы обеспечивается использованием массовых мобильных устройств и исключает выход человека на лёд (съёмка с берега/моста).

3. Доказано ускорение вычислений на порядки за счет оптимизации (NumPy, OpenCV, C++ ядра). Точность заявлена и подтверждена моделью расчета.

4. Описана полная цепочка автоматической обработки от «сырых» данных облака точек до классифицированной 3D-модели с визуализированными зонами риска.

Список литературы

1. Романов А.В. Дорожная карта современных гидрологических прогнозов водного режима // *Метеорология и гидрология*. 2023. № 12. С. 12-26. – DOI 10.52002/0130-2906-2023-12-12-26.
2. Квач Е.Г. Особенности гидрологического режима трансграничных водных объектов Республики Беларусь и Российской Федерации // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2023. № 4. С. 93-104. DOI 10.35567/19994508_2023_4_3.
3. Каюмов А.К., Расулзода Т.Х., Курбонов Н.Б., Восидов Ф.К. Влияние изменения климата на гидрологический режим водных артерий бассейна реки Пяндж // *Криосфера*. 2022. № 1(5). С. 91-104.
4. Бураков И.И., Федоров В.О. Использование библиотек NUMPY, NUMPY-STL И OPENCV при построении трехмерной модели зуба // *Оригинальные исследования*. 2022. № 4(12). С. 48-59.
5. Семенов И.А., Шефер П.П. Использование библиотеки Numpy для языка программирования Python в работе ученого и инженера // *Современные технологии и научно-технический прогресс*. 2024. № 11. С. 167-168.
6. Масаев С.Н., Ильгов А.Р. Применение генетического алгоритма для оптимизации двумерных массивов с использованием библиотеки Numpy в Python // *Информатизация и связь*. 2025. № 2. С. 27-32. DOI 10.34219/2078-8320-2025-16-2-27-32.
7. Ненашев В.А., Воронов Р.М., Березин А.В., Матвеев А.Д., Лосев В.К. Распознавание наземных объектов в авиационных системах потоковой обработки оптических кадров // *Информационно-измерительные и управляющие системы*. 2024. № 4(22). С. 85-90.
8. Тарануха С.Н., Кузьмин А.А., Фомина И.К., Фомин В.В. Сверточные нейронные сети в задачах оценки формирования компетенций обучающихся основам сварки // *Транспортное дело России*. 2025. № 2. С. 116-120.
9. Козин В.М., Лебедев А.А. Энергоэффективные технологии разрушения ледяного покрова судами на воздушной подушке резонансным методом // *Вестник инженерной школы ДВФУ*. 2022. № 3. С. 20-26.
10. Фомина И.К., Супрунец М.И., Корниенко К.Ю., Фомин В.В. Применение нейросетевых технологий для контроля состояния остановочных павильонов городского транспорта // *Транспортное дело России*. 2025. № 4. – С. 86-90.
11. Фомин В.В., Фомина И.К., Шабунин А.П. Исследование потенциала BERT-трансформера для тематической классификации новостных и научных статей // *Информатизация образования и науки*. 2025. № 2(66). С. 59-69.

References

1. Romanov A.V. Dorozhnaya karta sovremenny`x gidrologicheskix prognozov vodnogo rezhima [Roadmap for Modern Hydrological Forecasts of Water Regime], *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology], 2023, no 12. pp. 12-26. – DOI 10.52002/0130-2906-2023-12-12-26. (In Russ).
2. Kvach E.G. Osobennosti gidrologicheskogo rezhima transgranichny`x vodny`x ob`ektov Respubliki Belarus` i Rossijskoj Federacii [Features of the Hydrological Regime of Transboundary Water Objects in the Republic of Belarus and the Russian Federation], *Vodnoe khozyajstvo Rossii: problemy`, tehnologii, upravlenie* [Water Management in Russia: Problems, Technologies, and Management], 2023, no 4. pp. 93-104. DOI 10.35567/19994508_2023_4_3. (In Russ).
3. Kayumov A.K., Rasulzoda T.X., Kurbonov N.B., Vosidov F.K. Vliyanie izmeneniya klimata na gidrologicheskij rezhim vodny`x arterij bassejna reki Pyandzh [Vliyanie izmeneniya klimata na gidrologicheskij rezhim vodny`x arterij bassejna reki Pyandzh], *Kriosfera* [Kriosfera], 2022, no 1(5). pp. 91-104. (In Russ).
4. Burakov I.I., Fedorov V.O. Ispol`zovanie bibliotek NUMPY, NUMPY-STL I OPENCV pri postroenii trexmernoj modeli zuba [Use of NUMPY, NUMPY-STL, and OPENCV Libraries in Constructing a Three-Dimensional Tooth Model], *Original`ny`e issledovaniya* [Original Research], 2022, no 4(12). pp. 48-59. (In Russ).

5. Semenov I.A., Shefer P.P. Ispol'zovanie biblioteki Numpy dlya yazy'ka programmirovaniya Python v rabote uchenogo i inzhenera [Using the Numpy Library for the Python Programming Language in the Work of Scientists and Engineers], *Sovremennyye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskij progress [Modern Technologies and Scientific and Technical Progress]*, 2024, no 11, pp. 167-168. (In Russ).
6. Masaev S.N., Il'gov A.R. Primenenie geneticheskogo algoritma dlya optimizacii dvumerny'x massivov s ispol'zovaniem biblioteki Numpy v Python [Application of a genetic algorithm for optimizing two-dimensional arrays using the Numpy library in Python], *Informatizaciya i svyaz' [Informatization and Communication]*, 2025, no 2, pp. 27-32. DOI 10.34219/2078-8320-2025-16-2-27-32. (In Russ).
7. Nenashev V.A., Voronov R.M., Berezin A.V., Matveev A.D., Losev V.K. Raspoznavanie nazemny'x ob'ektov v aviacionny'x sistemax potokovoj obrabotki opticheskix kadrov [Recognition of Ground Objects in Aviation Systems for Streaming Optical Frame Processing], *Informacionno-izmeritel'ny'e i upravlyayushhie sistemy' [Information, Measurement, and Control Systems]*, 2024, no 4(22), pp. 85-90. (In Russ).
8. Taranuxa S.N., Kuz'min A.A., Fomina I.K., Fomin V.V. Svertochnyye nejronny'e seti v zadachax ocenki formirovaniya kompetencij obuchayushhixsya osnovam svarki [Convolutional Neural Networks in the Tasks of Assessing the Formation of Competencies of Students in the Basics of Welding], *Transportnoe delo Rossii [Transport Business of Russia]*, 2025, no 2, pp. 116-120. (In Russ).
9. Kozin V.M., Lebedev A.A. E'nergoeffektivny'e tekhnologii razrusheniya ledyanogo pokrova sudami na vozduшной podushke rezonansny'm metodom [Energy-Efficient Technologies for Breaking Ice Cover by Hovercrafts Using the Resonance Method], *Vestnik inzhenernoj shkoly' DVFU [Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University]*, 2022, no 3, pp. 20-26. (In Russ).
10. Fomina I.K., Suprunecz M.I., Kornienko K.Yu., Fomin V.V. Primenenie nejrosetevy'x tekhnologij dlya kontrolya sostoyaniya ostanovochny'x pavil'onov gorodskogo transporta [Application of neural network technologies for monitoring the condition of urban transport stoppings], *Transportnoe delo Rossii [Transport Business of Russia]*, 2025, no 4, pp. 86-90. (In Russ).
11. Fomin V.V., Fomina I.K., Shabunin A.P. Issledovanie potentsiala BERT-transformera dlya tematicheskoj klassifikacii novostny'x i nauchny'x statej [Research of the BERT Transformer's Potential for the Thematic Classification of News and Scientific Articles], *Informatizaciya obrazovaniya i nauki [Informatization of Education and Science]*, 2025, no 2(66), pp. 59-69. (In Russ).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ // INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Фомина Инга Константиновна, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. (ФГАОУ ВО ГУАП) 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А. fominga@list.ru

Inga K. Fomina, Associate Professor, PhD, Tech., Associate Professor at the Department of Computing Systems and Networks at the St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. (FGAOU VO GUAP) 190000, Saint Petersburg, Bolshaya Morskaya Street, 67, Building A. fominga@list.ru

Смирнов Егор Андреевич, бакалавр кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. (ФГАОУ ВО ГУАП) 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А., egor4e4ik@gmail.com

Egor A. Smirnov, Bachelor of the Department of Computing Systems and Networks of the St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. (FGAOU VO GUAP) 190000, Saint Petersburg, Bolshaya Morskaya str., 67, lit. A., egor4e4ik@gmail.com

Статья поступила в редакцию 29.12.2025; принята к публикации 05.02.2026; опубликована онлайн 20.03.2026. Received 29.12.2025; published online 20.03.2026.

Проектирование судов и судового оборудования.

Некоторые проекты кафедры ПиТПС



Сбалансированные Якоря повышенной держащей силы

- масса от 105 до 10125 кг,
- замещают импортные якоря AC-14 Full Balance;
- могут изготавливаться с якорной скобой или якорной скобой вращающейся .



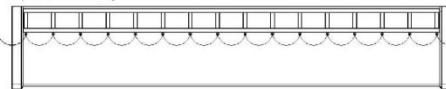
Балансирные и небалансирные якоря АК24Б и АК24

- масса от 5610 до 15000 кг,
- являются аналогами импортных якорей AR-14.

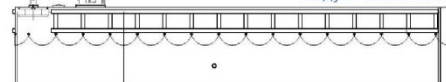
Понтон композитный модульный

Является базовым модулем плавучести для установки на палубе надстроек различного назначения (гостиница, ресторан, мастерская и т.д.), класс РКО №Р «1,2»

Средний модуль

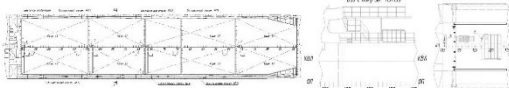


Модуль оконечности



Модернизация теплохода ЛЕНА-НЕФТЬ (проект Р77)

Модернизация нефтеналивного танкера проекта Р-77 в танкер заправщик с дооборудованием корпуса вторым дном. После модернизации судно может выполнять функции по бункеровке судов топливом и маслом и соответствует экологическим требованиям



Технология судоремонта

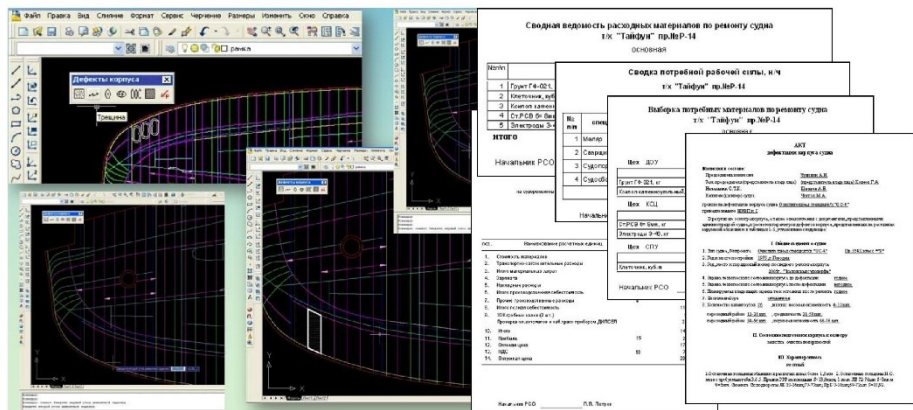
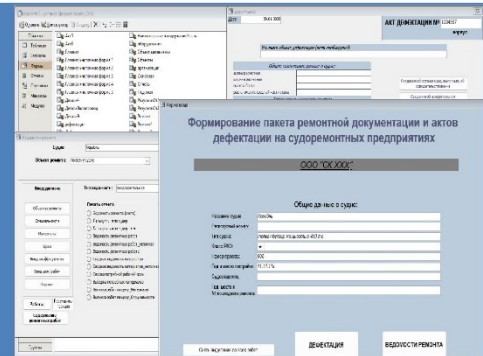


В рамках Научно-исследовательского проекта по формированию информационно-технологической платформы "Флот-Сервис-Судоремонт" для судов внутреннего и река-море плавания

Автоматизированная подготовка документации при ремонте судов

пакет прикладных программ подготовки организационно-технической документации при ремонте судов.

Является основой для Научно-исследовательского проекта по формированию информационно-технологической платформы "Флот-Сервис-Судоремонт" для судов внутреннего и река-море плавания



Система обеспечивает:

- получение в автоматическом режиме отчетов по дефектации и формирование на их основе предварительной ведомости ремонта
- автоматизированный расчёт трудоёмкости и отпускной стоимости ремонтных работ
- автоматизированное формирование полного пакета организационно-технической документации

Автоматизированная система успешно реализована на предприятиях отрасли таких как АО «Чкаловская судостроительная верфь», ООО «Волжская судоходная компания» и др.

Внедрение данного программного обеспечения позволяет в период зимнего ремонта полностью автоматизировать подготовку документации по всем ремонтируемым судам и сократить время её обработки до 20 раз.



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

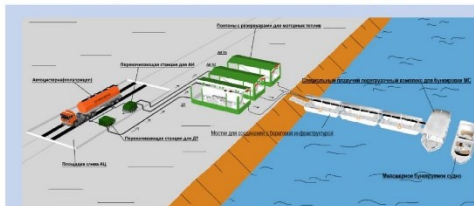


Бункеровочная станция

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.

Большая топливораздаточная платформа



Данный вид станции одного типа с малой платформой, отличие заключается в габаритных размерах и типе устанавливаемой раздаточной колонки.



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 судовверфи:



Проектирование под самострой (частные заказчики)



Кемпер-боты



Конструкторское бюро разработало проектную документацию для плавучих домов (хаусботов) различных российских производителей, от эскизных проектов и построенной 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) 110-36-67
kb@vsuwt.ru / kbvsuwt.ru

КБ имени инженера-конструктора Е.В. Фальмонова - подразделение Управления научной и инновационной деятельности ФГБОУ ВО «ВГУВТ»





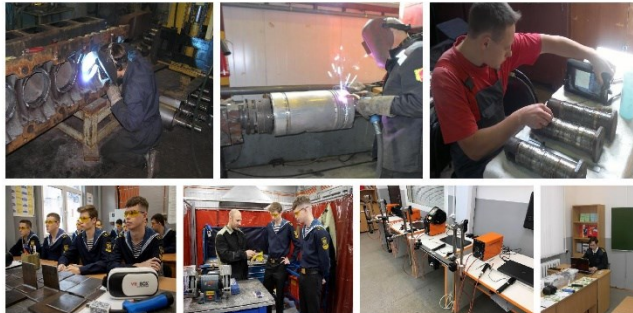
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ТРЕНАЖЕРНЫЙ ЦЕНТР «МЕХАНИК»



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТДЕЛ



УЧЕБНО-ТРЕНАЖЕРНАЯ БАЗА / участок на АО «БОРРЕМФЛОТ» / СВАРОЧНЫЙ ПОЛИГОН



“ На производстве, особенно сейчас, важную роль играют люди рабочих специальностей высокой квалификации. Работа центра «Механик» во многом отвечает задачам подготовки кадров. Отраслевая направленность и наличие реальных заказов, научный подход, позволяют лучше раскрывать профессию.

- - 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.



www.vsuwt.ru

Россия, Н.Новгород, ул. Б. Печерская 93

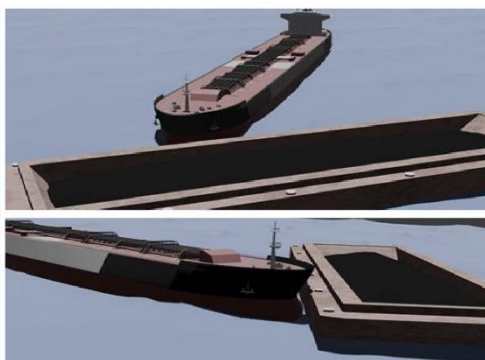


Методика производства воднотранспортных экспертиз

Старт нового направления

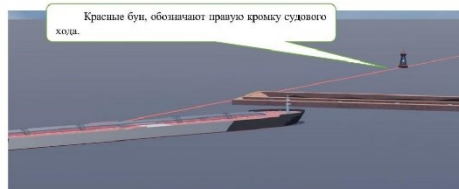
Разработана экспертная методика производства судебных воднотранспортных экспертиз, включающая трёхмерное моделирование расследуемого события.

Новизной выступает сочетание трехмерной визуализации и последовательности этапов выполнения экспертизы



“

Сделай истину очевидной



Внедрение методов трехмерной визуализации в судебную экспертизу

Коллектив авторов методики: сотрудники кафедры уголовно-правовых дисциплин.

Суть методики – визуализация нарушений нормативно-правовой регламентации деятельности, которые привели к воднотранспортному происшествию.

Значение для следствия и судов:

- обеспечивает наглядность результатов экспертизы
- повышает эффективность использования специальных знаний при расследовании преступлений;
- уменьшает количество экспертных ошибок;

Основные этапы экспертной методики :

- первоначальное установление экспертом-криминалистом совместно с лицом,

назначившим экспертизу, юридически значимых сторон изучаемого события (уяснение экспертной задачи);

- изучение нормативно-правовой регламентации соответствующих видов деятельности;
- мысленное моделирование исследуемого события по следовой картине преступления;
- верификация модели на основе всех имеющихся у эксперта данных;
- визуализация модели с помощью компьютерного моделирования.
- установление не соответствий между нормативно-правовой регламентацией деятельности и результатами моделирования;
- формулировка выводов;
- оформление экспертного Заключение.

Иновационная Методика применяется для проведения судебных экспертиз.

Разрабатываются подходы создания VR сцен, создана специальная лаборатория. Формируется нормативная база по применимости в более широком количестве случаев

www.vsuwt.ru

Информация для авторов

Требования к оформлению статей, а также примеры оформления списков литературы изложены на сайте журнала <http://journal.vsuwt.ru/index.php/jwt/rules>

I. Материалы, предоставляемые автором в редакцию:

1. Файл с текстом статьи (в формате Microsoft Word или RTF) направляется на электронный адрес journal@vsuwt.ru либо gaeva.oa@yandex.ru. Рекомендованный объем статьи – 0,5 - 1 печатных листов (8-16 страниц).
2. Экспертное заключение о возможности открытого опубликования материалов статьи (можно прислать PDF файл на электронную почту gaeva.oa@yandex.ru, либо направляется в бумажном виде по адресу г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, д.5, к.971).

II. Основные требования к содержанию статьи:

1. Материал, предлагаемый для публикации, должен быть оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях. Научная статья должна содержать очевидный элемент создания нового знания в сравнении с имеющейся научной литературой по избранной теме исследования. Предпочтение отдается статьям научно-теоретического, научно-практического и аналитического характера.
2. Показатель итоговой оценки оригинальности текста в системе Антиплагиат должен быть не менее 80%, показатель заимствования не более 10%, показатель самоцитирования не более 25%

При оформлении статьи рекомендуется ориентироваться на публикации, вошедшие в Текущий выпуск.

III. Перечень структурных элементов статьи

1. УДК (из классификатора)
2. Надпись "DOI: 10.37890/jwt.vi"
3. Название статьи
4. Сведения об авторах в формате:
 - Инициалы, Фамилия (на русском языке) каждого автора, например, И.И. Иванов
 - Идентификатор автора ORCID, например, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8255-3017>
 - Перечень учреждений всех авторов без сокращений (не указывать организационно-правовую форму), место издания, например, Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия
5. Аннотация объемом 100-250 слов текста (не менее 10 строк)
6. Ключевые слова – 8-10 слов или словосочетаний
7. Название статьи на английском языке
8. Сведения об авторах на английском в формате:
 - Имя, О., Фамилия каждого автора (на английском языке), например, Ivan I. Ivanov
 - Идентификатор автора ORCID
 - Перечень учреждений всех авторов на английском языке, например, Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia.
9. Аннотация (Abstract) на английском языке.
10. Ключевые слова (Keywords) на английском языке.
11. Текст статьи (должен быть структурирован; рекомендуется структура IMRAD (<https://ru.wikipedia.org/wiki/IMRAD>), например:
 - Введение
 - Методы
 - Результаты
 - Обсуждение
 - Заключение
 - Благодарности
12. Список литературы
13. References (литература на английском языке)

14. Информация об авторах на русском и английском языках:

- имя, отчество, фамилия;
- должность, звание, ученая степень, кафедра, подразделение;
- полное и сокращенное название организации, где выполняется работа, адрес;
- e-mail

15. Координаты для обратной связи (e-mail, телефон)

16. Рубрика журнала, в которую подается статья для рассмотрения

IV. Оформление структурных элементов статьи

Общее оформление – редакция принимает тексты, сохраненные в формате .doc, .docx, .rtf.

- Размер шрифта 12, Times New Roman;
- Интервал между строками одинарный;
- Поля: левое - 3 см, правое - 1,5 см, верхнее - 2 см, нижнее - 2 см;

УДК – универсальная десятичная классификация, используется для систематизации научных статей. Определяется по классификатору (можно найти в Интернете). Если статья включает несколько областей знаний, то для объединения нескольких кодов используются знаки препинания (+ (плюс) - знак присоединения, / (косая черта) - знак распространения, : (двоеточие) – знак простого отношения, :: (двойное двоеточие) - знак закрепления последовательности, [] (квадратные скобки) – знак группирования).

DOI: 10.37890/jwt.vi — это префикс журнала.

Название статьи - должно кратко (не более 10 слов) и точно отражать содержание статьи (не допускаются названия, имеющие обороты такие как «К вопросу...», «Некоторые аспекты...» и аналогичные).

Оформляется полужирным шрифтом, форматруется по центру. **Заглавными буквами оформлять не надо!**

Аннотация – это краткое точное изложение содержания документа, включающее основные сведения и выводы работы. Аннотация дает возможность установить основное содержание документа, используется в информационных (автоматизированных) системах для поиска документов. Аннотация выполняет функцию инструмента, позволяющего читателю понять, следует ли обращаться к полному тексту статьи. Аннотация должна быть информативной (не содержащей общих слов), содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследования), структурированной. Структура аннотации должна полностью повторять структуру статьи. В тексте аннотации следует применять значимые слова из текста статьи.

Ключевые слова - должны характеризовать предметную область исследования. Во всех библиографических базах данных осуществляется поиск статей по ключевым словам. (не более 3-х слов внутри ключевой фразы). Слова и/или словосочетания отделяются запятой.

Англоязычные переводы (название статьи, сведения об авторах, аннотация (Abstract), ключевые слова (Keywords), литература (References)– должны быть качественными.

Текст статьи - должен быть структурирован, название частей необходимо выделять соответствующими подзаголовками, которые оформляются полужирным шрифтом и форматуются по центру. Разделы Введение (Постановка задачи) и Заключение (Выводы) являются обязательными. Приветствуется использование структуры IMRaD (<https://ru.wikipedia.org/wiki/IMRAD>):

1. **Введение** (актуальность) - описание проблемы, обзор литературы, связанной с исследованием, формулирование цели и задач исследования, обозначение нерешенных проблем, обоснование теоретической и практической значимости.
2. **Методы** - описание методов, условий и схем экспериментов, приборов, материалов и оборудования. указывается последовательность выполнения исследования и обосновывается выбор используемых методов (наблюдение, опрос, тестирование, эксперимент, лабораторный опыт, анализ, моделирование и т. д.).
3. **Результаты** - представление экспериментальных или теоретических данных, полученных в ходе исследований (могут быть представлены в виде таблиц, графиков, диаграмм, уравнений, фотографий, рисунков). Это основной раздел, цель которого – доказать рабочую гипотезу (гипотезы).
4. **Обсуждение** - интерпретация полученных результатов, предположения, сопоставление, сравнение полученных результатов с результатами других авторов и т.д.
5. **Заключение** - структурированные выводы, соответствующие постановке задачи исследования во введении, делаются обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

6. *Благодарности* - можно упомянуть людей, помогавших авторам подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку (например, номер гранта РФФИ). Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Таблицы - должны быть подготовлены стандартными средствами MS Office. Надпись Таблица 1 форматируется по правому краю (размер шрифта 11, начертание - курсив). Название таблицы форматируется по центру полужирным шрифтом. На все таблицы (табл.1) должны быть ссылки в тексте

Рисунки - рисунки допускаются как в растровом, так и в векторном формате. Минимальное разрешение - 300 dpi. Каждое графическое изображение должно представлять собой единый, цельный объект. Подпись к рисункам приводится на русском и английском языках. Ширина подписи примерно соответствует ширине рисунка. Текстовые подписи под рисунком не должны быть частью рисунка. Рисунки (диаграммы, графики) должны допускать возможность редактирования и изменения их размеров. По возможности используйте для графического материала минимально требуемое разрешение. На все рисунки (рис.1) должны быть ссылки в тексте. Рисунки и иллюстрации вставляются в текст, а не в таблицы!

Формулы - все формулы набираются в редакторах Microsoft Equation 3.0, MathType 6 или Конструкторе формул Microsoft Word. Шрифт символов, входящих в формулы - комбинация Symbol и Times New Roman. Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылка в тексте статьи. Если формула появляется в тексте как отдельная строка, она должна быть центрирована и, при необходимости, помечена сквозной нумерацией арабскими цифрами в круглых скобках. Если формула появляется внутри текста, обращайтесь внимание на размеры используемых шрифтов, чтобы они были «состыкованы» с размерами текста работы. Не сохраняйте формулы в виде рисунка и не вставляйте их в таблицы!

Список литературы – является обязательным элементом статьи. Ссылка на публикацию в научной статье является одним из главных показателей качества публикации, а статья с представительным списком литературы демонстрирует профессиональный кругозор и качественный уровень исследований ее авторов. Правильное описание используемых источников в списках литературы является залогом того, что цитируемая публикация будет учтена при оценке научной деятельности ее автора. По цитированию журнала определяется его научный уровень, авторитетность, эффективность деятельности ее редколлегии. Каждый научный факт должен сопровождаться отдельной ссылкой на источник. При формировании списка литературы необходимо придерживаться следующих правил:

- оформляется в соответствии с ГОСТ Р 7.0.100-2018.
- источники в списке литературы нумеруются и располагаются в порядке их упоминания в тексте.
- ссылки на все источники литературы в тексте статьи обязательны;
- не менее 10 ссылок;
- приветствуются ссылки на англоязычные источники;
- на свои статьи (самоцитирование) не более 20-25% от общего числа ссылок
- ссылки на статьи периодических изданий (за последние 5 лет), опубликованные в рецензируемых научных журналах, индексируемых в РИНЦ, Scopus, WoS, должны составлять не менее 25%;
- если цитируемая статья имеет DOI, необходимо указывать его после описания цитируемой статьи. Для проверки наличия у статьи DOI можно, например, воспользоваться сервисом Crossref по ссылке <https://search.crossref.org/references>
- нежелательно включать в списки литературы анонимные источники и нормативные документы (постановления, законы, инструкции и т.д.), которые никогда не будут проиндексированы в базах данных цитирования, предпочтительно их цитировать непосредственно в тексте или во внутритекстовых сносках;
- нежелательно использовать в списках литературы авторефераты диссертаций и диссертации, учебные пособия и учебники;
- анонимные интернет-источники необходимо указывать в постраничных сносках, а не в списках литературы.

References - список литературы на английском языке.

Для русскоязычных статей необходимо указывать: ФИО авторов на латинице (транслитерация); название статьи (транслитерация); перевод названия статьи на английский язык; название журнала на английском языке (транслитерация, если нет информации об использовании журналом англоязычного названия); выходные данные с обозначением на английском языке (год, том, номер страницы «от-до»); указание на язык статьи, если она представлена на русском языке (In Russ.); DOI статьи (при наличии) или URL при отсутствии DOI, если есть доступ к статье.

В этом разделе должны использоваться только английские символы, наличие кириллических знаков не допускается. При ссылке на сайты, содержащие в названии русские символы, придется воспользоваться так называемым punicode-конвертором (например, <https://hb.by/punicode-converter.aspx>). С помощью подобных онлайн-сервисов имя сайта преобразуется в специальный код, который и указывается вместо русскоязычного названия. К примеру, ссылка «<http://вф-река-море.рф>» преобразуется в <http://xn----7kcgqcbassog3b.xn--plai/>.

Для перевода русского текста на латиницу используются правила **British Standart Institution**. Транслитерация производится с помощью автоматического транслитератора (Формат BSI), например, <http://transliteration.pro/bsi>. (не делать транслитерацию вручную).

Ссылка на статью в журнале

Author A.A., Author B.B., Author C.C. Nazvanie stat'i [Title of the Article], Nazvanie zhurnala [Title of Journal], 2021, no. 66, pp. 120—130.

Ссылка на книгу

Familia I.O. Nazvanie knigi [Title of the Book]. Gorod, Izdatelstvo Publ., 2015, 450 p.

Ссылка на переводное издание

Familia I.O. [Original Title of the Book]. Gorod, Izdatelstvo Publ., 2015, 450 p. (in Russ.)

Ссылка на статью в сборнике статей (I.O. Sostavitel = фамилия отв. редактора или составителя)

Familia I.O. Nazvanie stat'i [Title of the Article*], Nazvanie sbornika statei [Title of the Digest*], ed. I.O. Sostavitel. Gorod, Izdatelstvo Publ., 2015, pp. 10—15.

Ссылка на статью в электронном журнале

Familia I.O. Nazvanie stat'i [Title of the Article*], Nazvanie zhurnala [Title of Journal], 2015, no.5. Available at: <http://observatoria.rsl.ru/ru/s3/s17/s364/ok12015/> (accessed 01.12.2015)

Информация об авторах на русском и английском языках – оформляется в конце работы в виде таблицы (в качестве образца можно использовать статьи, опубликованные с 2020 года (№62))

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Митрошин Сергей Григорьевич, к.т.н., доцент, доцент кафедры экономики и менеджмента, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: priemnaya@vgavt-nn.ru

Sergey G. Mitroshin, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Economics and Management, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951, e-mail: priemnaya@vgavt-nn.ru

Раева Ольга Александровна, начальник издательского отдела, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: raeva@vsawt.com

Olga A. Raeva, Head of Publishing Department, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951, e-mail: raeva@vsawt.com

Редакция не рассматривает к публикации статьи, оформление которых не соответствует всем необходимым требованиям.

**Научные проблемы
водного транспорта**

**Russian Journal of Water
Transport**

№86(1), 2026

Формат бумаги 70x180 1/16. Бумага офсетная.
Ризография. Усл. печ. л. 15,25. Уч.-изд. л. 21,35.
Заказ. Тираж 500.

Федеральное агентство морского и речного транспорта.
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Волжский государственный университет водного транспорта»
(ФГБОУ ВО «ВГУВТ»)
Отпечатано в типографии ООО «Нижегородская типография». Адрес 603000,
Нижегородская область, г. Нижний Новгород, ул. Варварская, 10/25.

Свободная цена

Подписной индекс в каталоге
Агентства "Книга-Сервис"
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, 30.03.2026*

Научные проблемы водного транспорта № 86 (1) 2026

