



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

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

Научные проблемы водного транспорта

№84 (3) 2025

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;

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

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

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

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

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

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 Федорович, 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.



<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 №84 (3) 2025

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 Belorussian 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 university 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 university 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 university 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 university 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 university 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. Бимбереков, А. Д. Емельянов

Анализ способов ведения выморозочных работ и исследование закономерностей формирования подводного канала от соотношения гидростатического давления заглубления и давления внутри оболочки под днищем плоскодонного судна 13

С.Д. Костерина, Ю.А. Кочнев, А.С. Степанова

Математическое и геометрическое моделирование судовых бесштоковых якорей повышенной держащей силы..... 30

Ю. Н. Цветков, В. А. Петров, Н. М. Вихров

Выбор вида механических испытаний металлических образцов для построения зависимости микротвёрдости от интенсивности пластической деформации 42

Е.Ю. Чебан, М.Н. Москалева, А.И. Кожевников

Исследование влияния несимметричных корпусов на гидродинамику речного катамарана грузоподъемностью 1000т. 56

Судовое энергетическое оборудование

В.И. Брежнев, В.А. Жуков

Анализ переходных процессов судовых дизель-генераторных установок 69

С. Ю. Курицын, Ю. И. Матвеев, А. В. Соловьев

Разработка стенда для определения сил трения в деталях цилиндропоршневой группы судового дизеля 78

А.В. Лисаченко, Н.И. Николаев, В.В. Герасиди

Результаты экспериментального исследования теплофизических параметров современных главных высокооборотных электронно-управляемых двигателей 90

Е.С. Шишов, С.Н. Зеленев

Валидация численной модели лопастной системы осевого насоса ОД-2 101

Экономика, логистика и менеджмент на транспорте

Д.Д. Бухалкин, В.Н. Костров

Научно-методические подходы к оценке влияния инновационных цифровых технологий и услуг на трансформацию цепей поставок продукции нефтехимических предприятий..... 115

Д.В. Дрейбанд, Д.А. Коришунов

Метод транспортного баланса в планировании работы флота на скоростных пассажирских линиях внутреннего водного транспорта 130

О.А. Казьмина, С.Н. Тарануха, И.К. Фомина

Цифровизация оценки качества подготовки специалистов для водного транспорта..... 140

М.Л. Лучкова, И.Н. Лучков, Е.А. Седова

Проблемы и перспективы развития внутреннего водного транспорта в Европе..... 153

Хусейн Карам

Современное состояние научно-методического обеспечения и практические вопросы развития транспортно-логистического обслуживания внешнеторговых грузов в портах МТК «Север-Юг»..... 163

В.С. Чеботарев, П.Н. Пешехонов, О.Л. Морозов, А.В. Дорожкин

Инновационный подход в IT-технологиях пригородного железнодорожного комплекса 172

Эксплуатация водного транспорта, водные пути, сообщения и гидрография

С.С. Герасимов, А.Н. Ситнов

Исследование влияния скорости судна на русловой процесс в районе оголенного трубопровода по результатам математического моделирования гидравлики потока..... 185

Н.В. Гончарова, Ю.Н. Уртминцев

Обоснование комбинированных транспортно-логистических схем доставки минеральных удобрений через терминалы портов МТК «Север-Юг» 196

Костин П.А., Богатырева Е.В., Киселевич М.Э.

Оценка безопасности маневрирования судов в системах водных путей по относительному навигационному риску..... 213

А.А. Приваленко

Сравнительный анализ моделей краткосрочного прогнозирования погоды для систем автономного наблюдения..... 220

Н. Н. Фомичева, О. В. Спиренкова, А. С. Тушина

Исследования формы свободной поверхности потока, образующейся на сосредоточенном перепаде 227

CONTENTS

Shipbuilding, ship repair and ecological safety of the ship

Pavel A. Bimberekov, Andrew D. Emelyanov

Analysis of conducting freezing operations methods and the investigation of the formation patterns of an underwater channel from the ratio of the hydrostatic pressure of the depth and the pressure inside the shell under the bottom of a flat-bottomed vessel..... 13

Sofia D. Kosterina, Yuri A. Kochnev, Alla S. Stepanova

Mathematical and geometric modeling of ship stemless anchors with increased holding power 30

Yuriy N. Tsvetkov, Vasiliy A. Petrov, Nikolay M. Vihrov

Choice of the mechanical testing to plot the dependence of the microhardness of metal on the plastic strain 42

Egor Yu. Cheban, Maria N. Moskaleva, Artur I. Kozhevnikov

Study of the influence of asymmetrical hulls on the hydrodynamics of a river catamaran 1000-ton capacity..... 56

Ship power equipment

Vladislav I. Brezhnev, Vladimir A. Zhukov

Analysis of transient processes of marine diesel generator sets 69

Sergey Y. Kuritsyn, Yuri I. Matveev, Alexey V. Solovyov

Development of a stand for determining the friction forces in the details of the cylinder piston group of marine diesel..... 78

Alexey V. Lisachenko, Nikolay I. Nikolaev, Viktor V. Gerasidi

Results of an experimental study of the thermophysical parameters of modern high-speed electronically controlled main engines 90

Egor S. Shishov, Sergey N. Zelenov

Validation of the numerical model of the vane system of the axial-flow pump OD-2 101

Economics, logistics and transport management

Danila D. Bukhalkin, Vladimir N. Kostrov

Scientific and methodological approaches to assessing the impact of innovative digital technologies and services on the transformation of petrochemical enterprises' supply chains 115

Dmitry V. Dreiband, Dmitry A. Korshunov

The method of transport balance in fleet planning for high-speed inland waterway passenger lines 130

Olesya A. Kazmina, Svetlana N. Taranukha, Inga K. Fomina

Digitalization of quality assessment of training water transport specialists 140

Mariya. L. Luchkova, Ivan. N. Luchkov, Ekaterina. A. Sedova

Problems and prospects for the development of inland water transport in Europe 153

Karam Husein

The current state of scientific and methodological support and practical issues of the development of transport and logistics services for foreign trade goods in the ports of the North-South ITC 163

Vladislav S. Chebotarev, Pavel N. Peshekhonov, Oleg L. Morozov, Artyom V. Dorozhkin

An innovative approach in IT technologies of the suburban railway complex 172

Water transport operation, waterways communications and hydrography

Sergey S. Gerasimov, Aleksandr N. Sitnov

Study of the influence of vessel speed on the channel process in the area of an exposed pipeline based on the results of mathematical modeling of flow hydraulics 185

Natalia V. Goncharova, Yuriy N. Urtmintsev

Substantiation of combined transport and logistics schemes for mineral fertilizers delivery through the terminals of the ITC «North-South» ports 196

Pavel A. Kostin, Elena V. Bogatyreva, Mikhail E. Kiselevich

Assessing ship manoeuvring safety in waterway systems by relative navigational risk 213

Alexey A. Privalenko

Comparative analysis of short-term weather forecasting models for autonomous observation systems 220

Nyailya N. Fomicheva, Olga V. Spirenkova, Alexandra S. Tushina

Studies of the shape of the free flow surface formed on a concentrated drop 227

**СУДОСТРОЕНИЕ, СУДОРЕМОНТ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ
БЕЗОПАСНОСТЬ СУДНА**

**SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND ECOLOGICAL SAFETY
OF THE SHIP**

УДК 629.12:629.1:62-408

DOI: 10.37890/jwt.vi84.640

**Анализ способов ведения выморозочных работ и
исследование закономерностей формирования подводного
канала от соотношения гидростатического давления
заглубления и давления внутри оболочки под днищем
плоскодонного судна**

П. А. Бимбереков

ORCID: 0000-0003-4303-8570

А. Д. Емельянов

ORCID: 0009-0003-9356-6176

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

Аннотация. В статье представлен анализ существующих методов вымораживания судов и методов, послуживших основанием для разработки оговоренных методов выморозочных работ. Охарактеризован способ «Ведения выморозочных работ» согласно патента Российской Федерации на изобретение №2067141, как наиболее гарантирующий форму создаваемого подводного канала под корпус судна ускоренными темпами. Исследовалась зависимость формы и размеров формируемого подводного ледового канала в зависимости от исходного диаметра используемой оболочки, давления в ней и заглубления под корпусом судна. Геометрические параметры канала должны обеспечить удовлетворительные для ведения судоремонтных работ размеры. Надувные оболочки под давлением прокачиваемого холодного воздуха определяют получаемую форму и размеры подводного канала, предназначенного для ведения судоремонтных работ: по дефектации, ремонту и техническому обслуживанию корпусных конструкций. Исследование формы оболочки под днищем плоскодонного судна производилось путем модельного эксперимента с ящиком из прозрачного материала (аквариумом), под которым была закреплена рамка, собранная из линеек с миллиметровой шкалой, что позволяло фиксировать зону примыкания и форму надувной оболочки под корпусом. Для чего, проводилась фото фиксация размеров оболочки при помощи подводной съёмки и съёмки с помощью эндоскопа изнутри надувной оболочки. Получены закономерности формы и размеров оболочки, находящейся под корпусом модели при разных соотношениях значений давления в оболочке и глубины её погружения при разных осадках модели, фиксируемых по маркам углубления выполненных из линеек с миллиметровой шкалой.

Ключевые слова: выморозочные работы, надувная эластичная оболочка, гидростатическое давление, заглубления оболочки.

Analysis of conducting freezing operations methods and the investigation of the formation patterns of an underwater channel from the ratio of the hydrostatic pressure of the depth and the pressure inside the shell under the bottom of a flat-bottomed vessel

Pavel A. Bimberekov

ORCID: 0000-0003-4303-8570

Andrew D. Emelyanov

ORCID: 0009-0003-9356-6176

Siberian State University of Water Transport, Russian Federation

Abstract. The article presents an analysis of existing methods of freezing ships and the methods that served as the basis for the development of agreed methods of freezing operations. The method of "Conducting freezing operations" according to the patent of the Russian Federation for invention No. 2067141 is characterized as the most guaranteeing the shape of the created underwater channel under the hull of the vessel. The dependence of the shape and size of the formed underwater ice channel was studied depending on the initial diameter of the shell used, the pressure in it and the depth under the hull of the vessel. The dimensions of the shell under the pressure of the pumped cold air determine the resulting shape and dimensions of the underwater channel intended for carrying out work on defecation, repair and maintenance of hull structures. These dimensions should satisfactorily ensure that the specified work can be carried out in freezing conditions. The shell shape was studied by means of a model experiment with an object with transparent walls on which a frame assembled from rulers with a millimeter scale was fixed, which made it possible to fix the zone of attachment of the inflatable shell under the body. In addition, the size of the shell was photographed using underwater photography and endoscope photography from inside the inflatable shell. Patterns of the shape and size of the shell located under the body of the object are obtained at different ratios of the pressure values in the shell and the depth of its immersion, fixed by the indentation marks made from rulers with a millimeter scale.

Keywords: freezing operations, inflatable elastic shell, hydrostatic pressure, shell indentations.

Введение

Одним из широко используемых способов обеспечения доступа к корпусам судов в подводной части без их докования является проведение выморозочных работ. Традиционные методы вымораживания требуют значительных временных и трудовых затрат, сопряжены с серьёзным риском затопления зоны выморозок и даже повреждения корпусов судов. Наиболее распространён, в настоящее время, метод ручного удаления льда для доступа к корпусу судна. Он предполагает вырубку или выпиливание ледяных блоков вокруг ремонтируемого участка с использованием ручных инструментов (пешни, бензопилы, лома) или механизированных средств (гидравлические дробилки). После разметки зоны рабочие пропиливают лёд по контуру, извлекают фрагменты льда и очищают поверхность корпуса от остатков льда [1...3], примеры ведения выморозочных работ широко отражены на Интернет-ресурсах, например, [4], рис. 1. Предварительно корпус окалывают. Данный метод требует большого опыта ведения таких работ для минимизации их сроков исполнения при утонении ледовой корки в зоне выморозочных работ. Для ведения выморозочных работ существуют специальные нормы времени [5].

Основываясь на технических решениях [6,7] были разработаны способы ведения выморозочных работ [8,9]. Способ [8] заключается в том, что во льду проделываются майны с обоих бортов ремонтируемого корпуса судна рис. 2,3. Через них под корпус судна заводится эластичная оболочка, которая затем закачивается холодным воздухом. Требуемое давление достигается посредством редукционного клапана,

который при дальнейшей закачке воздуха и обеспечивает переток последнего через эластичную оболочку. После достижения вокруг продуваемой оболочки ледовых стенок требуемой толщины, в оболочку закачивают горячий воздух, который получают подключением к работе воздухонагнетательного устройства калорифера. Эластичная оболочка высвобождается из льда и извлекается наружу. Доводка выморозки ведется обычными методами.

Способ [9] предусматривает получение во льду у борта судна ямы. Под ледяной покров нагнетают воздух объемами не более объема полости, ограниченной сверху покровом, снизу водой, с боков по контуру предстоящей ямы ледяными стенками, которые сверху вниз промораживают прямыми неразборными в подводной части теплообменниками, ранее установленными в покров непосредственно за контуром, до дна предстоящей ямы, после чего нагнетание прекращают, а дно предстоящей ямы промораживают L-образными неразборными в подводной части теплообменниками, установленными в покров одновременно с прямыми теплообменниками, в результате получают замкнутую в ледяную оболочку полость, которую вскрывают, и удаляют глыбы льда за грузовые петли, ранее установленные в покров одновременно с теплообменниками внутри контура.

Метод [9] не позволяет достаточно точного контроля формы получаемой выморозки и поэтому за объект исследования была выбрана составляющая метода [8], включающая получение требуемой для удовлетворительных условий дефектационных и ремонтно-восстановительных работ формы поперечного сечения подводимой надувной оболочки, обеспечивающей после намораживания соответствующую форму подводного канала. Кроме того, сохранение надувной оболочки в целости до начала ведения работ по корпусу судна позволяет сохранять незатопленной зону выморозки при возможных подвижках ледового поля. При использовании нескольких оболочек или последовательного одной оболочки может быть получено выморозка с требуемой зоной оголения корпуса.

Цель работы: выявление зависимости формы оболочки от глубины погружения и величины внутреннего давления с помощью модельных испытаний.



Рис. 1. Пример использования выморозки методом ручного удаления льда

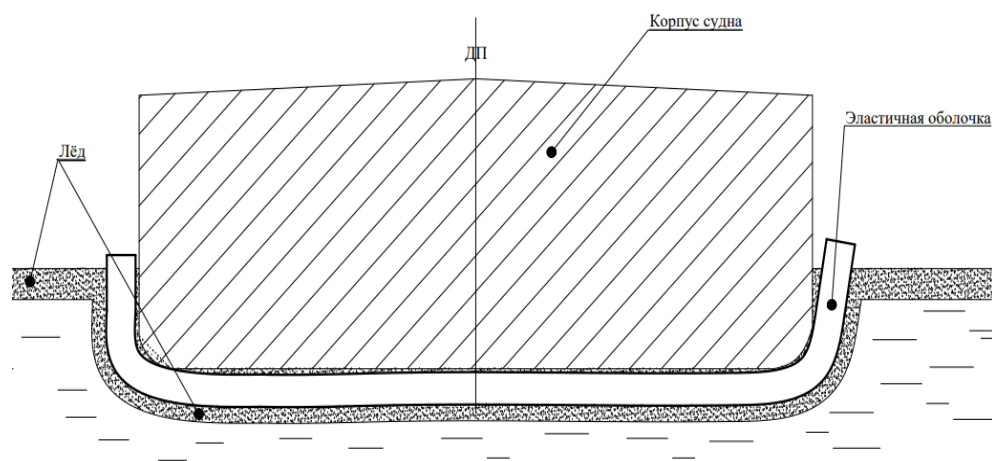


Рис. 2. Способ ведения выморозочных работ по патенту № 2067141С1

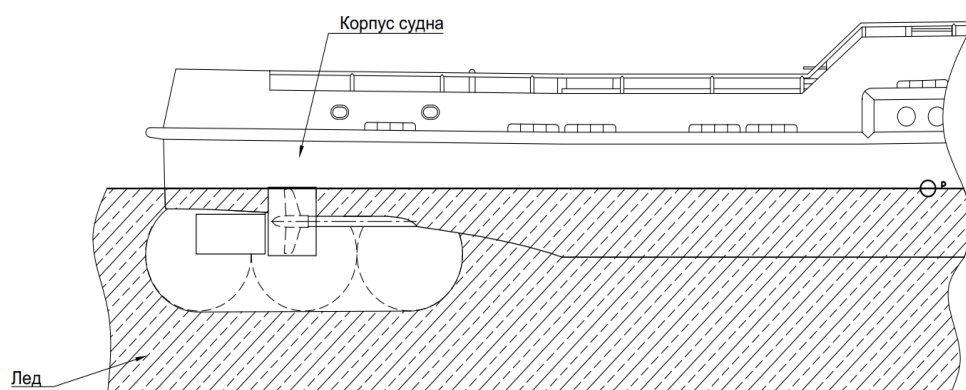


Рис. 3. Возможное использование трех оболочек с последующей выборкой льда между ними

Объекты и методика модельных испытаний

В качестве масштабной модели судна использовался прямоугольный прозрачный аквариум из оргстекла толщиной 10 мм и габаритными размерами $L \times B \times H = 690 \times 370 \times 425$ при осадках $T \in [50...75]$ с шагом в 5 мм. Прозрачность стенок позволила наблюдать за поведением оболочки и фиксировать её параметры (см. рис. 4, 5).

Мерительная рамка, закрепленная под аквариумом, использовалась для фиксации формы оболочки как при съёмке под водой, так и через дно аквариума.

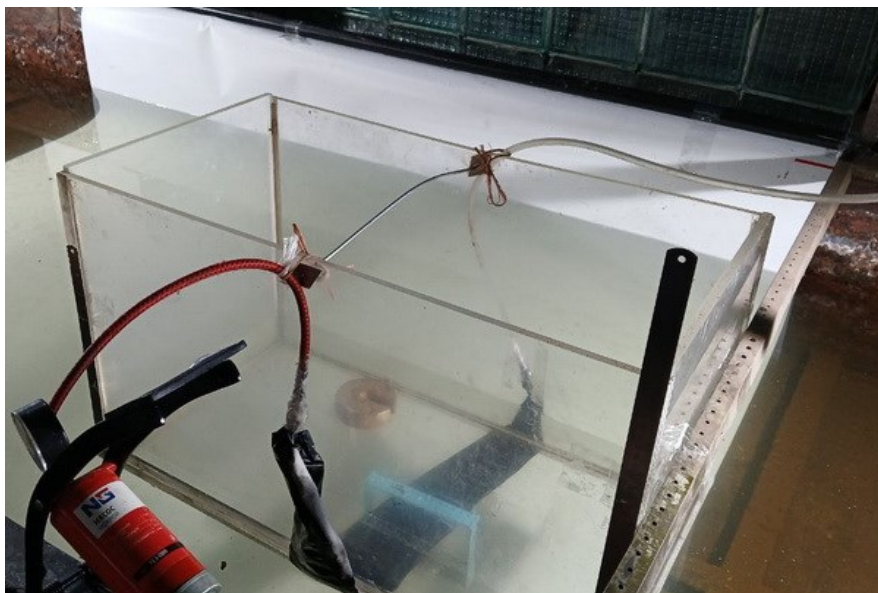


Рис. 4. Экспериментальная установка до закачки воздуха в оболочку

Для контроля осадки на стенках аквариума размещены вертикальные линейки.

На рис. 6...9 представлены фотофиксации моментов измерений в ходе проведения модельных испытаний.



Рис. 5. Экспериментальная установка. Мерительная рамка
(фото под водой)

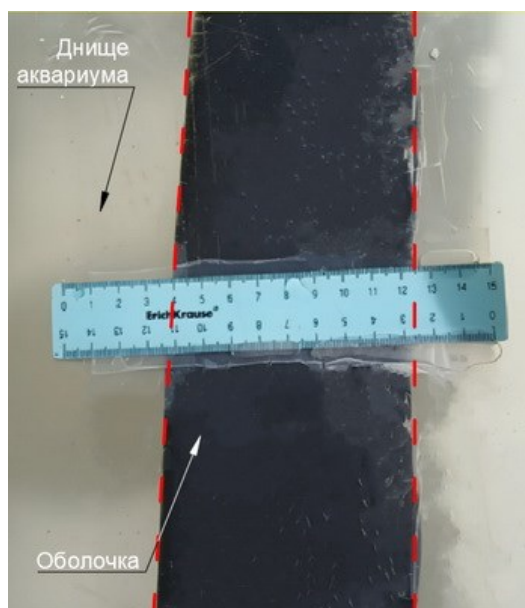


Рис. 6. Контроль прилегания оболочки к днищу аквариума

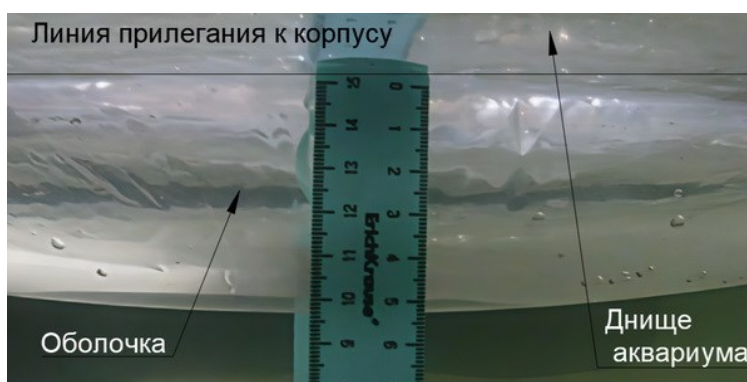


Рис. 7. Измерение высоты оболочки



Рис. 8. Вид на зону примыкания оболочки к дну аквариума

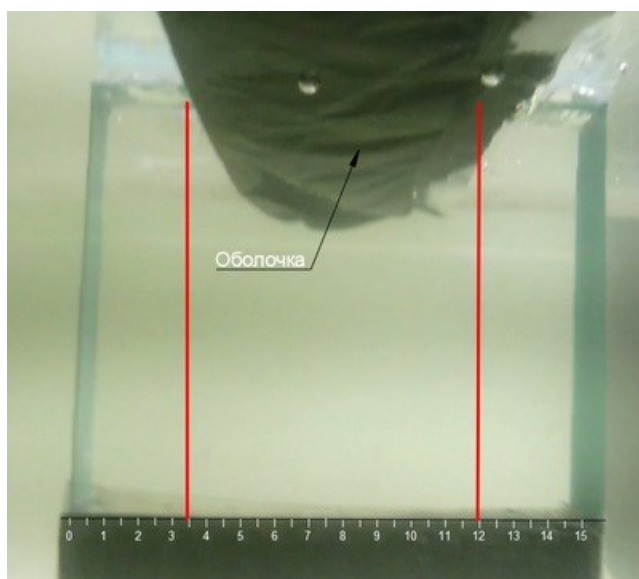


Рис. 9. Измерение ширины нижней части оболочки

На основании рис. 8 можно судить о том, что в случае плоскодонного днища судна оболочка в середине пролёта формируемого подводного канала заметно отходит от днища сохраняя меньшую ширину примыкания чем в районе скул.

Согласно рис. 8 ширина примыкания оболочки у скуловых подворотов примерно на треть больше, чем в диаметральной плоскости. Оценка изменения ширины зоны примыкания оболочки к плоскому днищу дала значение угла расширения зоны контакта от ДП к бортам примерно в 8° .

Из рис. 5, 7 достаточно хорошо фиксируется, что высота оболочки посреди ширины модели больше, чем у скул.

Так же на внутреннюю часть оболочки в нескольких поперечных сечениях была наклеена контурная нить и метка с отрезком 2 см, что позволило посредством компьютерной обработки регистрировать по фотоизображениям геометрические размеры оболочки, используя подход [10].

На рис. 10 дан пример фиксации формы оболочки в поперечном сечении, отмеченном наклеенной нитью.

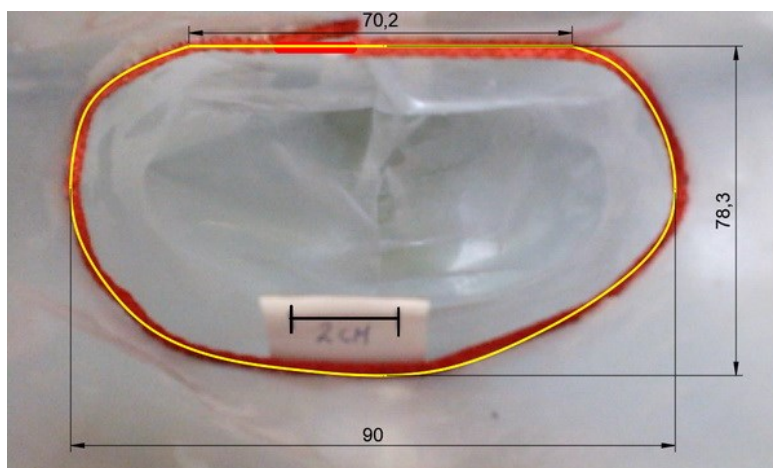


Рис. 10. Контурная нить при давлении внутри оболочки 45 мм вод. ст. на осадке 50 мм

Результаты исследования

Результаты измерений параметров оболочек при разных значениях осадок модели и давления в оболочках диаметрами 80 и 100 мм соответственно сведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Результаты измерений для оболочки 80 мм

№	Осадка, мм	Давление, мм вод. ст.	Ширина контакта оболочки и днища, мм	Высота оболочки, мм
1	50	35	75	44
2		40	69	50
3		45	61	59
4	55	40	76	43
5		45	67	53
6		50	58	62
7	60	40	76	44
8		45	70	52
9		55	63	58
10	65	48	74	45
11		55	67	54
12		60	60	58
13	70	50	72	47
14		55	65	54
15		65	55	63
16	75	55	74	43
17		60	64	56
18		65	58	61

По данным табл. 1, 2 построены диаграммы зависимостей значений ширины контакта оболочки, b , высоты оболочки под днищем, h , давления в оболочке, p , при двух её диаметрах, $d \in [80;100]$ рис. 11.

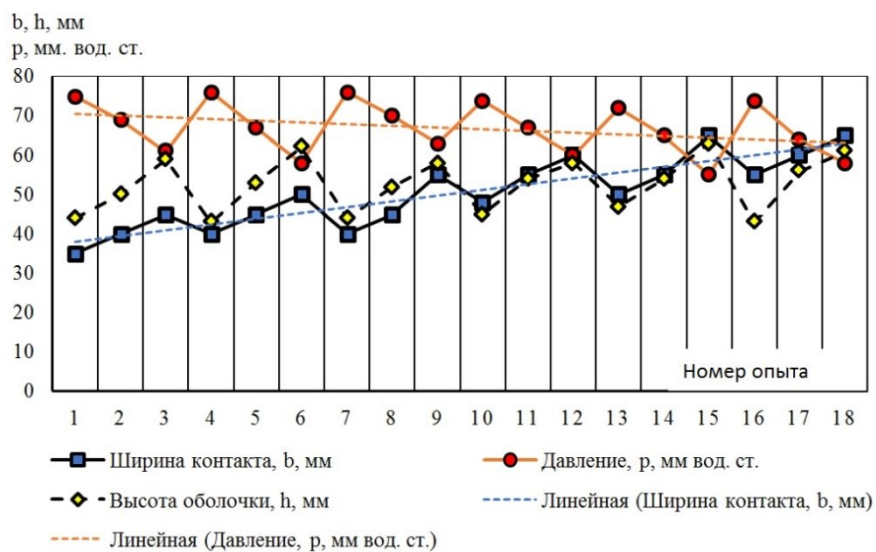
Из последнего видна вполне закономерная зависимость, показывающая, что при росте давления ширина контакта оболочки с днищем падает, а высота оболочки под днищем возрастает.

Таблица 2

Результаты измерений для оболочки 100 мм

№	Осадка, мм	Давление, мм вод. ст.	Ширина контакта оболочки и днища, мм	Высота оболочки, мм
1	50	35	90	61
2		40	77	75
3		45	65	78
4	55	40	83	68
5		45	75	75
6		50	65	82
7	60	40	84	70
8		45	67	78
9		55	55	85
10	65	48	78	72
11		55	64	80
12		60	62	88
13	70	50	79	75
14		55	70	77
15		65	65	80
16	75	55	84	70
17		60	75	73
18		65	71	78

а)



б)

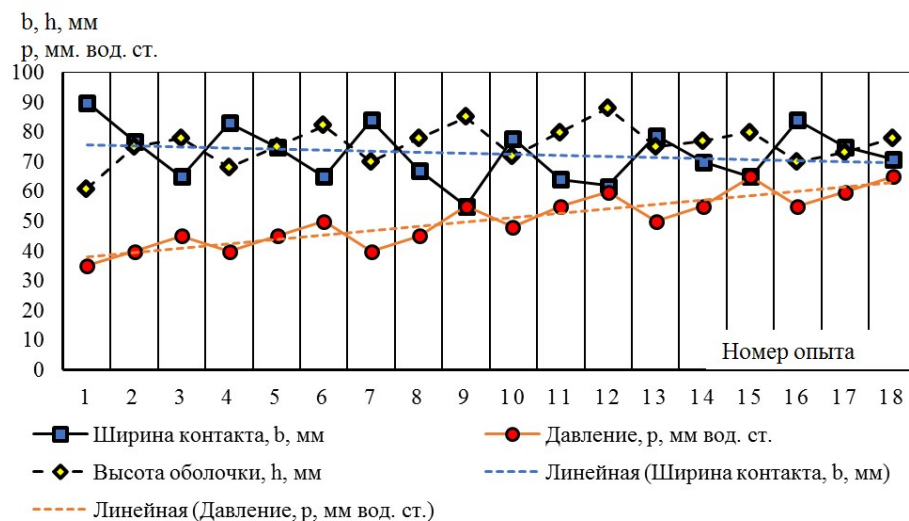


Рис. 11. Зависимость ширины, высоты и давления оболочки:
 а) при диаметре оболочки 80 мм; б) при диаметре оболочки 100 м
 Для выяснения взаимосвязи регистрируемых в исследовании показателей между собой
 построен ряд зависимостей рис. 12...19.

На рис. 12, 13 приведены графические зависимости вида $b = f(p/T)$ и $h = f(p/T)$. Даже не оценивая границы диапазона разброса случайных величин на основе графиков 12 из рассмотрения можно исключить точки с грубыми погрешностями под номерами 1, 8, 9 (выделенные желтым цветом на графике и в табл. 2), а на графике 13, дополнительно указанным можно исключить точку 12 (все указанные точки также выделены желтым цветом).

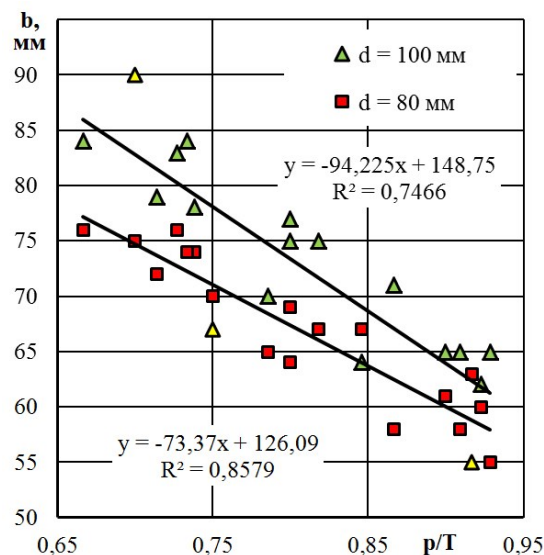


Рис. 12. Зависимость вида $b = f(p/T)$

С учетом исключения последних на рис. 14 представлены графические зависимости вида $h = f(b)$.

Для возможности их применения полученных зависимостей для оболочек произвольного диаметра приведем их к безразмерному виду, построив ряд выражений на данных табл. 1, 2.

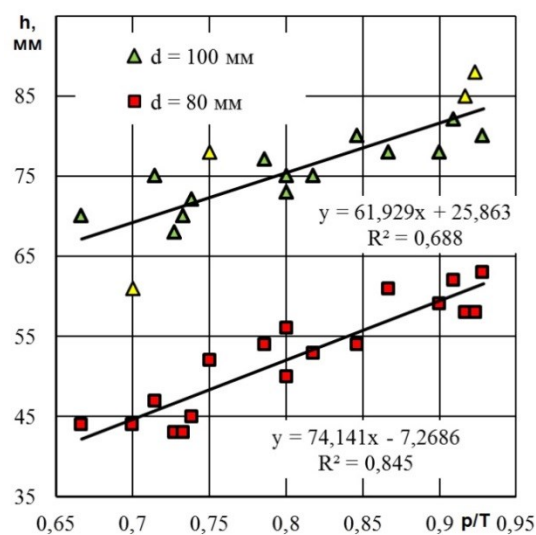


Рис. 13. Зависимость вида $h = f(p/T)$

На рис. 15...18 представлены зависимости вида $h/d = f(p/t)$, $b/d = f(p/t)$ и $(h+b)/2d = f(p/T)$.

Зависимость вида $(h+b)/2d = f(p/T)$ построена исходя из сопоставления рис. 15 и 17, где имеем обратное по направленности соотношение величин h/d и b/d при разных диаметрах оболочки.

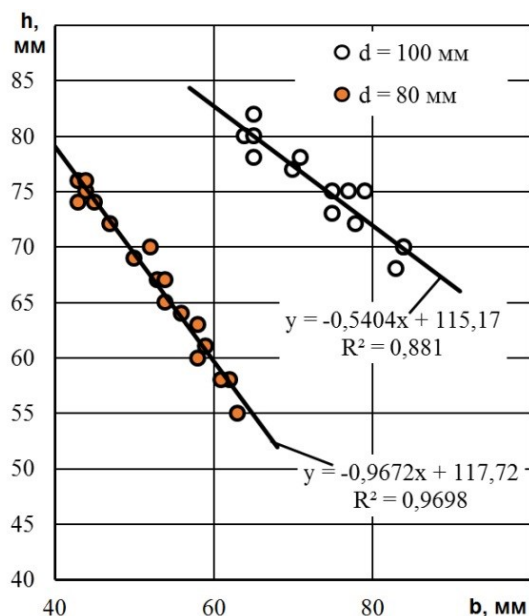


Рис. 14. Зависимость вида $h = f(b)$

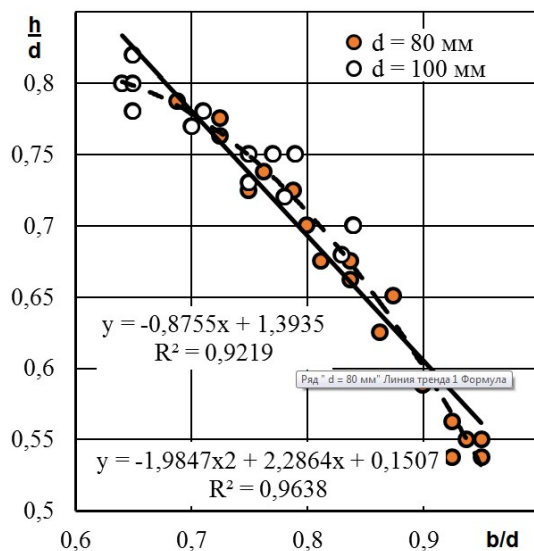


Рис. 15. Зависимость вида $h/d = f(b/d)$

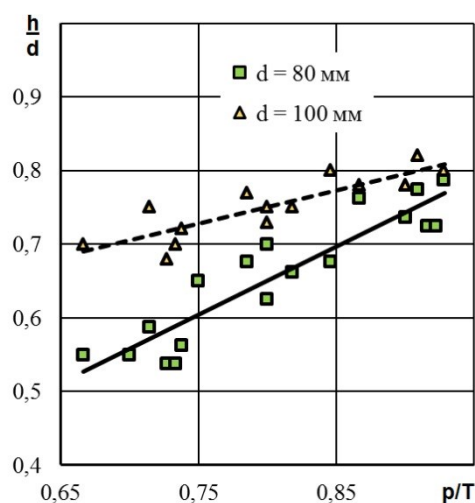


Рис. 16. Зависимость вида $h/d = f(p/T)$

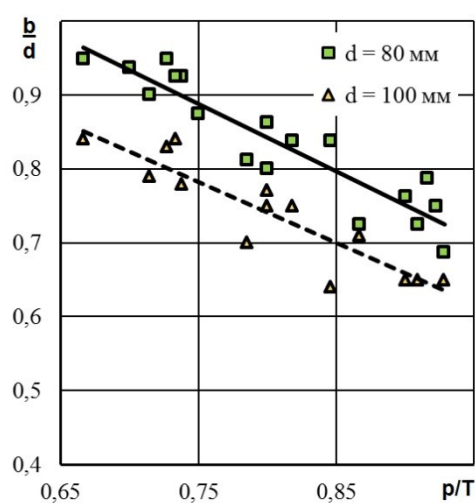


Рис. 17. Зависимость вида $b/d = f(p/T)$

На основе рис. 16, 18 дадим следующие аппроксимационные выражения для произвольного диаметра оболочки и относительного значения p/T :

$$h/d = -0,876b/d + 1,39, \quad (1)$$

или

$$h/d = -1,985(b/d)^2 + 2,286b/d + 0,151; \quad (2)$$

$$(h + b)/d \approx 1,5. \quad (3)$$

С целью увязки относительных значений ширины и высоты оболочки к её диаметру, а также значения давления и осадки подобрана графическая зависимость при двух испытанных диаметрах оболочки рис. 19, описываемая аппроксимационным выражением:

$$\frac{b}{d} = \frac{-0,675(p + 0,25h)}{T} + 1,51. \quad (4)$$

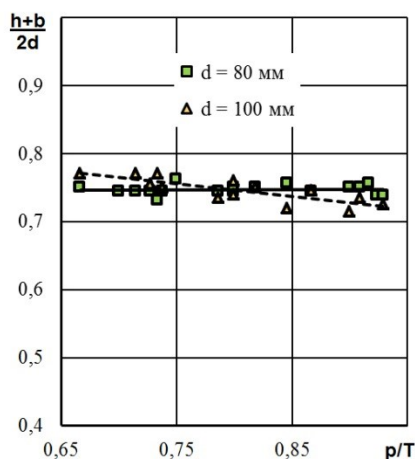


Рис. 18 Зависимость вида $(h+b)/(2d) = f(p/T)$

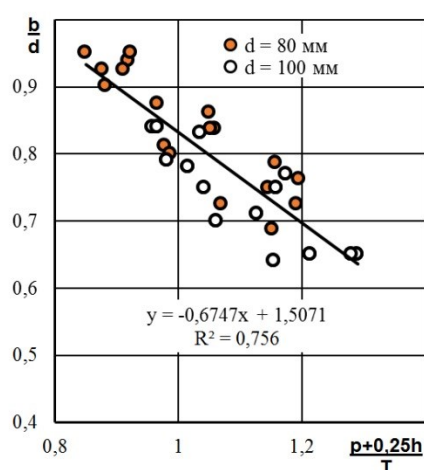


Рис. 19 Зависимость вида $b/d = f[(p+0,25h)/T]$

Обсуждение

Используя формы (1), (3), (4) произведем расчет требуемого диаметра оболочки с целью обеспечения минимальной высоты подводного канала к корпусным конструкциям днища в диаметральной плоскости (ДП) высотой 0,8 м, 1,0 м и 1,2 м при отношении p/T равному 0,9; 0,8 и 0,7 и варьируемых осадках судна от 0,2 м до 2 м. Минимальный размер 0,8 м принят опираясь на минимальную высоту двойного дна согласно [11]. Результаты расчета сведены в табл.3 и представлены на рис. 20,21.

В столбцах табл. 3 и далее указанные либо пронумерованные формулы, либо даны расчетные выражения через номера столбцов в квадратных скобках. Выражение в столбце 8 получено на базе формулы (4), его используем для взаимной оценки результатов столбцов 7 и 8. В столбце 10 дан расчет периметра сечения оболочки с определенным диаметром, а в столбце 11 оценочное значение периметра оболочки с прямоугольным сечением с размерами h и b . Из сопоставления столбцов 7 и 8 можно говорить о удовлетворительной работе формулы (3), а сопоставление столбцов 10 и 11 говорит о правдоподобности расчетных результатов табл. 3.

Данные зависимости позволяют прогнозировать поведение оболочек в натурных испытаниях, для образования ледового канала высотой 0,8-1,2 м при осадке от 0,2 до 2 м и отношений давления (измеряемого в метрах водяного столба) к осадке от 0,7 до 0,9 в ДП судна.

С учетом изменения ширины примыкания оболочки согласно рис. 8 при отступлении от ДП получаем зависимость:

$$b_y = b[1 + y \cdot \tan(8/57,3)], \quad (5)$$

где y – координата по ширине корпуса от ДП (будем условно считать для скулы $y = B/2$).

Таблица 3

	p/T	$T, м$	$h, м$	h/T	$b/d, (4)$	$h/d, (1)$	$d, м [3]/[6]$	$d, м \frac{([6]+[5])*[7]}{1,5}$	$b, м [5]*[7]$	$S = 3,14*d, м 3,14*[7]$	$S_{\square} = 2*(h+b), м 2*([3]+[9])$
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0,80	0,20	0,80	4,00	0,30	1,13	0,71	0,67	0,21	2,22	2,02
2	0,80	0,40	0,80	2,00	0,63	0,84	0,96	0,94	0,61	3,01	2,81
3	0,80	0,60	0,80	1,33	0,75	0,74	1,08	1,07	0,81	3,41	3,22
4	0,80	0,80	0,80	1,00	0,80	0,69	1,16	1,15	0,93	3,65	3,46
5	0,80	1,00	0,80	0,80	0,84	0,66	1,21	1,21	1,01	3,81	3,63
6	0,80	1,20	0,80	0,67	0,86	0,64	1,25	1,25	1,07	3,93	3,75
7	0,80	1,40	0,80	0,57	0,87	0,62	1,28	1,28	1,12	4,02	3,84
8	0,80	1,60	0,80	0,50	0,89	0,61	1,30	1,30	1,15	4,09	3,91
9	0,80	1,80	0,80	0,44	0,90	0,61	1,32	1,32	1,18	4,15	3,96
10	0,80	2,00	0,80	0,40	0,90	0,60	1,33	1,34	1,20	4,19	4,01

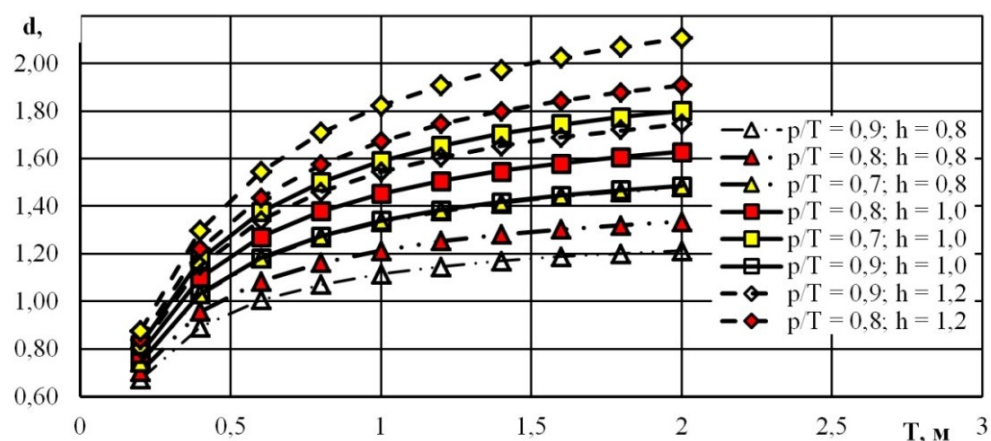


Рис. 20. Расчетная зависимость диаметра оболочки от осадки судна в ДП

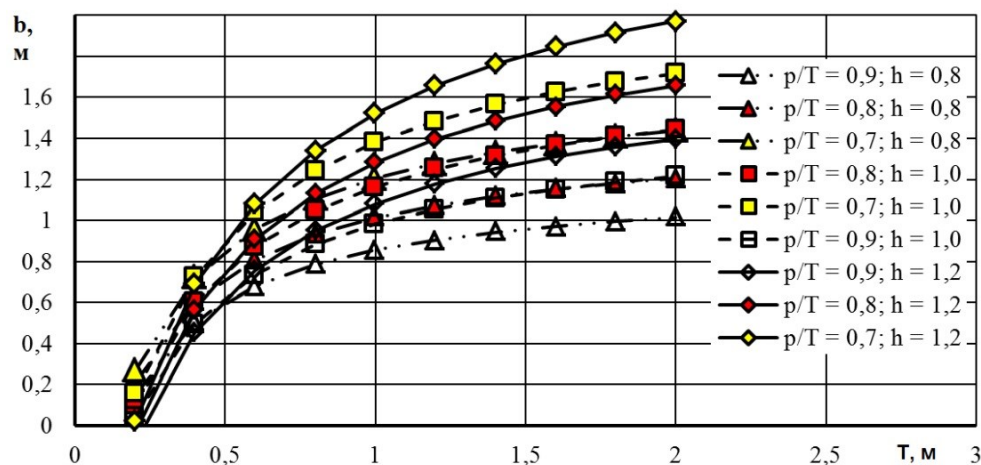


Рис. 21. Расчетная зависимость ширины оболочки от осадки судна в ДП

С учетом оговоренного угла уменьшения примыкания оболочки к днищу плоскодонного судна в 8° произведем систематический расчет размеров образуемого оболочкой канала в зависимости от полуширины судна, $B/2$ (табл. 4).

Из табл.4 следует, что для обеспечения одинаковой высоты формируемого ледового канала требуется изготовление надувной оболочки переменного диаметра при минимальном значении в ДП и максимальном у скулы. При этом для больших значений осадок судна расчетное значение диаметра оболочки у скулы становится мало рациональным, хотя увеличение относительного давления до 0,95 и более позволяет заметно его сократить.

Таблица 4

p/T	T, м	h, м	h/T	В диаметральной плоскости (ДП)						
				b/d (4)	h/d (1)	d, м [3]/[6]	d, м ([6]+[5])*[7] 1,5	b, м [5]*[7]	$S = \frac{3,14d}{3,14*[7]}$, м	$S_{\square} = \frac{2(h+b)}{2*([3]+[9])}$, м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,9	0,2	0,8	4,00	0,23	1,19	0,67	0,64	0,15	2,11	1,91
0,8	0,4	0,8	2,00	0,63	0,84	0,96	0,94	0,61	3,01	2,81
0,9				0,57	0,90	0,89	0,87	0,50	2,81	2,61
0,95				0,53	0,92	0,87	0,84	0,46	2,72	2,52
0,9	0,6	0,8	1,33	0,68	0,80	1,00	0,99	0,68	3,15	2,96
0,9	0,8	0,8	1,00	0,73	0,75	1,07	1,06	0,79	3,36	3,17
0,9	1	0,8	0,80	0,77	0,72	1,11	1,10	0,86	3,50	3,31
0,8	1,2	0,8	0,67	0,86	0,64	1,25	1,25	1,07	3,93	3,75
0,9				0,79	0,70	1,15	1,14	0,91	3,60	3,41
0,95				0,76	0,73	1,10	1,09	0,83	3,45	3,26
0,9	1,4	0,8	0,57	0,81	0,68	1,17	1,16	0,94	3,67	3,49
0,9	1,6	0,8	0,50	0,82	0,67	1,19	1,18	0,97	3,73	3,54
0,9	1,8	0,8	0,44	0,83	0,67	1,20	1,20	1,00	3,78	3,59
0,8	2,0	0,8	0,40	0,90	0,60	1,33	1,34	1,20	4,19	4,01
0,9				0,84	0,66	1,21	1,21	1,01	3,81	3,63
0,95				0,80	0,69	1,16	1,15	0,93	3,65	3,46

Продолжение табл. 4

У скулы при d = const				У скулы при h = const					
b _{скул} , м (5)	b _{скул} /d [12]/[7]	h _{скул} /d (1)	h _{скул} , м [14]/[7]	(b/d) _{скул} (4)	h/d _{скул} (1)	d _{скул} , м [15]/[17]	b _{скул} , м [16]/[18]	$S_{скул} = \frac{3,14d_{скул}}{3,14[18]}$, м	$S_{\square} = \frac{2*(h+b_{скул})}{2*([3]+[19])}$, м
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
0,26	0,39	1,05	0,71	0,39	1,05	0,76	0,29	2,39	2,19
1,03	1,08	0,45	0,43	1,08	0,45	1,79	1,93	5,62	5,46
0,86	0,96	0,55	0,49	0,96	0,55	1,46	1,41	4,59	4,41
0,78	0,90	0,60	0,52	0,90	0,60	1,34	1,21	4,20	4,02
1,16	1,15	0,38	0,38	1,15	0,38	2,11	2,43	6,62	6,46
1,34	1,25	0,30	0,32	1,25	0,30	2,71	3,38	8,50	8,36
1,46	1,31	0,25	0,27	1,31	0,25	3,26	4,26	10,24	10,13
1,83	1,46	0,11	0,14	1,46	0,11	7,21	10,52	22,63	22,64
1,54	1,34	0,21	0,24	1,35	0,21	3,78	5,08	11,87	11,77
1,42	1,29	0,26	0,29	1,29	0,26	3,05	3,93	9,59	9,46
1,61	1,37	0,19	0,22	1,37	0,19	4,26	5,85	13,38	13,30
1,66	1,39	0,17	0,20	1,39	0,17	4,71	6,56	14,80	14,73
1,69	1,41	0,16	0,19	1,41	0,16	5,14	7,24	16,13	16,07
2,05	1,54	0,04	0,06	1,54	0,04	18,22	28,00	57,22	57,60
1,73	1,42	0,14	0,18	1,42	0,14	5,53	7,87	17,37	17,33
1,59	1,36	0,19	0,23	1,36	0,19	4,10	5,60	12,89	12,80

Заключение

Проведенное исследование позволило установить зависимости формы и размеров надувных оболочек, располагаемых под корпусом судна при разных его осадках и давлении в оболочках. Полученные аналитические зависимости позволяют

производить расчетное проектирование оболочек с прогнозируемыми высотой и шириной подводного под корпус судна канала.

Список литературы

1. Малышев И.В. Отстой флота и выморозочные работы при судоремонте. – Москва : Транспорт, 1967, С.111
2. Гуревич И. М., Зеличенко А.Я., Кулик Ю. Г. Под ред. И.М. Гуревич. Технология судостроения и судоремонта. Учебник для вузов водн. трансп. М., «Транспорт», 1976 С.204-205.
3. Видецкий А.Ф. Книга. Справочник. Ремонт речных судов. ред. Видецкий А.Ф. М. Транспорт, 1988, с.34.
4. Выморозка кораблей. Полярник рассказал, как устроена самая тяжелая работа в мире, где роют ледяные тоннели.
URL:https://trendymen.ru/lifestyle/events/135839?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera/(дата обращения 28.08.2025).
5. Гуревич С.А., Маркова Ф. П., Усакова Н. Б., Узлова Л. П. Нормы времени на ледокольные и выморозочные работы. - Москва : Транспорт, 1967, С. 11-15.
6. 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).
7. Пат. №1124096 Способ возведения ледяных сооружений в водоемах: СССР, МПК E02B17/00, E02B7/00 Макаров В.И., Краснов Ю. Н., №3626028; заяв. 1983.07.21; опубл. 1984.11.15.
8. Пат. №565175 Установка для заготовки использования льда: СССР, М. Кл² F 25D 31/00, F 25C 1/02 / П.М. Енин, В. И. Облинцев, А. Г. Егизаров, В.Т. Новоков, В. А. Пойгин, Н. К. Люненко и Б. И. Вакуленко - №2060931/13 заяв. 17.09.74; опубл. 15.07.77. Бюл. №26.
9. Пат. № 2067141 Способ выполнения выморозочных работ: Российская Федерация, МПК E02 B 14/00 / Бимбереков П.А.; заявитель и патентообладатель Бимбереков П.А. –№92015926/11; заяв. 30.12.1992; опубл. 27.09.1996, бюл. №24.
10. Пат. №2254525 Способ выморозки судна: Российская Федерация, МПК F25 C 1/12, E 02 B 17/00 / Бутаков А.Н.; заявитель и патентообладатель Бутаков А.Н. - №2001133500/12; заяв. 07.12.2001; опубл. 27.03.2004 Бюл. №17.
11. Бимбереков П.А., Звонков В.Д. Исследование точности определения значений по шкале осадок с применением фото и видеосъемки. Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока, 2014, № 1-2, с. 169-173.

References

1. Malyshev, I. V. Fleet layup and freezing operations during ship repair. – Moscow : Transport, 1967, p.111
2. Gurevich, I. M., Zelichenko, A. Ya., Kulik, Yu. G. Under the editorship of I. M. Gurevich. Technology of shipbuilding and ship repair. Textbook for higher education institutions of water transport. Moscow, "Transport", 1976 pp. 204-205.
3. Videtsky, A. F. Book. Handbook. Repair of river vessels. ed. Videtsky, A. F. Moscow Transport, 1988, p. 34.
4. Vymorozka korablej. Polyarnik rasskazal, kak ustroena samaya tyazhelaya rabota v mire, gde royut ledyanye tonneli.
URL:https://trendymen.ru/lifestyle/events/135839?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera/(data obrashcheniya 28.08.2025).
5. Gurevich, S.A., Markova, F.P., Usakova, N.B., Uzlova, L.P. Time standards for icebreaking and freezing operations. - Moscow : Transport, 1967, p.11-15
6. FAU «Rossijskoe Klassifikacionnoe Obshchestvo». Pravila klassifikatsii i postroyki sudov. 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/> (data obrashcheniya 18.05.25).

7. Pat. №1124096 Method for constructing ice structures in reservoirs: USSR, IPC E02B17/00, E02B7/00 Makarov, V.I., Krasnov, Yu.N., No. 3626028; declared. 1983.07.21; published. 1984.11.15.
8. Pat. №565175 Installation for harvesting and using ice: USSR, IPC F 25D 31/00, F 25C 1/02 / P.M. Enin, V.I. Oblintsev, A.G. Egiazarov, V.T. Novokov, V.A. Poigin, N.K. Lyunenkov and B.I. Vakulenko - declared No. 2060931/13. 17.09.74; published 15.07.77. Bulletin No. 26.
9. Pat. №2067141 Method for performing freezing operations: Russian Federation, IPC E02 B 14/00 / Bimberekov, P.A.; applicant and patent holder Bimberekov, P.A. – No. 92015926/11; appl. 30.12.1992; published 27.09.1996, Bulletin No. 24.
10. Pat. №2254525 Method for freezing out a vessel: Russian Federation, IPC F25 C 1/12, E 02 B 17/00 / Butakov, A.N.; applicant and patent holder Butakov, A.N. -№2001133500/12; declared 07.12.2001; published 27.03.2004 Bulletin №17.
11. Bimberekov, P.A., Zvonkov, V.D. Study of the accuracy of determining values on the draft scale using photo and video filming. Scientific problems of transport of Siberia and the Far East, 2014, No. 1-2, pp.169-173.

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

Емельянов Андрей Дмитриевич, аспирант, Сибирский государственный университет водного транспорта, 630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: vip.andrey.emelyanov@mail.ru

Andrey D. Emelyanov, graduate student, Siberian State University of Water Transport, 630099, Novosibirsk, Shchetinkina str., 33, e-mail: vip.andrey.emelyanov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 28.07.2025; опубликована онлайн 20.09.2025.
Received 28.07.2025; published online 20.09.2025.

УДК 629.12

DOI: 10.37890/jwt.vi84.612

Математическое и геометрическое моделирование судовых бесштоковых якорей повышенной держащей силы

С.Д. Костерина

ORCID: 0009-0001-8380-5546

Ю.А. Кочнев

ORCID: 0000-0002-6864-4473

А.С. Степанова

ORCID: 0000-0002-6611-1518

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

Аннотация. Разработка и модернизация существующих судовых якорей, таких как SPEK, DELTA, LWT, Денфорта, АС-14, Холл, Матросова, под современные требования проектных и конструкторских организаций требует обоснованного подхода, который осуществляется на внедрение в процесс проектирования математического описания основных свойств и дальнейшего трёхмерного моделирования в одном из компьютерных пакетов. Математическая модель якоря при этом представляется совокупностью уравнений и неравенств, отражающих баланс масс деталей и якоря в целом, химического состава материала, технологических и прочностных требований к отдельным элементам конструкции, качеству якоря в виде его держащей силы. Все геометрические характеристики при разработке трёхмерных цифровых двойников изделия параметрически зависимы от основных нормируемых стандартами размеров, распределение которых от массы представляется в виде степенной функции с приведёнными в работе значениями полученных коэффициентов регрессии. Особенности создания цифровых двойников судового якоря рассмотрено на основе моделирования его наиболее сложной части – лапы, которые осуществляется в виде элементарных геометрических фигур: параллелепипеда, призмы, конуса и т.п.. Все это позволяет разрабатывать и моделировать современные, отвечающие новым пожеланиям заказчиков судовые якоря повышенной держащей силы.

Ключевые слова: якоря повышенной держащей силы, геометрические характеристики якоря

Mathematical and geometric modeling of ship stemless anchors with increased holding power

Sofia D. Kosterina

ORCID: 0009-0001-8380-5546

Yuri A. Kochnev

ORCID: 0000-0002-6864-4473

Alla S. Stepanova

ORCID: 0000-0002-6611-1518

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Development and modernization of existing ship anchors, such as SPEK, DELTA, LWT, Danforth, AC-14, Hall, Matrosov, to meet modern requirements of design and engineering organizations requires a well-founded approach, which is carried out by introducing into the design process a mathematical description of the main properties and further three-dimensional modeling in one of the computer packages. The anchor's mathematical model is represented by a set of equations and inequalities reflecting the mass balance of parts and the anchor as a whole, the chemical composition of the material,

technological and strength requirements for individual elements of the structure, the quality of the anchor in the form of its holding force. All geometric characteristics in the development of three-dimensional digital twins of the product are parametrically dependent on the main dimensions standardized by standards, the distribution of which from the mass is represented as a power function with the values of the obtained regression coefficients given in the work. The features of creating digital twins of a ship's anchor are considered based on modeling its most complex part - the fluke, which is realized in the form of elementary geometric figures: a parallelepiped, a prism, a cone, etc. All this allows us to develop and model modern ship anchors with increased holding power that meet the new wishes of customers.

Keywords: high holding force anchors, geometric characteristics of the anchor

Введение

На настоящий момент в судостроительной промышленности используются якоря со стандартными размерами по каталогам предприятий. Их выбор формы и размеров для установки на судно осуществляется по массово-габаритным характеристикам. Однако при проектировании современных судов с большим числом конструктивных особенностей, достаточно часто возникает необходимость установки на них и, соответственно, разработки уникального по геометрическим особенностям якоря, который в существующих каталогах отсутствуют.

На мировом рынке в настоящее время широкое распространение получили литые якоря повышенной державы следующих основных типов: SPEK, DELTA, LWT (LIGHTWEIGHT), Денфорта, AC-14, Матросова, представленные на рисунке 1 [1]. Факт их принадлежности к категории повышенной державы подтверждается сравнением с якорем Холл (HALL) в соответствии с требованиями Правил РМРС [2].

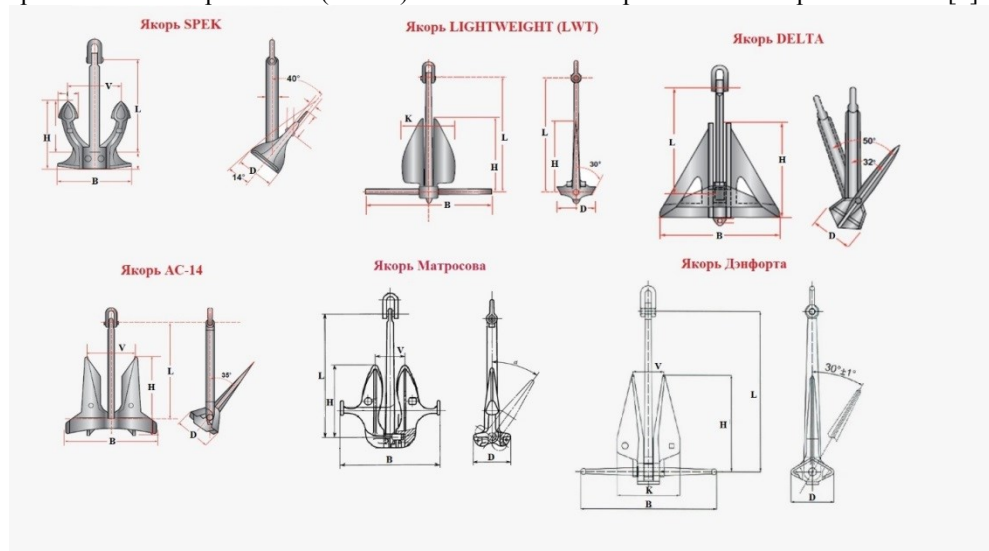


Рис. 1. Типы якорей повышенной державы [1]

В конечном счете изменение по форме или геометрическим размерам выполняется на основании модернизации одного из приведённых типов якорей, для обоснования которых требуется качественно разработанный математический аппарат, опирающийся на описание взаимосвязи между известными и не известными характеристиками якоря, используемых в дальнейшем при его геометрическом моделировании в средствах трёхмерного проектирования.

Таким образом целью работы является разработка методики математического и геометрического моделирования судовых бесштоковых якорей, произвольных масс, не зависящих от типа-размерного ряда, применённого в стандартах и каталогах.

Математическая модель якоря

Математическую модель судового якоря [3] повышенной держащей силы в общем виде можно представить как совокупность уравнений и неравенств [4], отражающих многообразные требования и качества к данному элементу судового устройства, которые функционально записываются в виде

$$\begin{cases} M_i = f(X, R, P), & i \in I, \\ M_\psi \leq s(X, R, P), & \psi \in \Psi, \end{cases} \quad (1)$$

где M_i – i -ое качество (требование) из множества I , уровень которого регламентируется конкретным значением;

M_ψ – ψ -е качество (требование) из множества Ψ , нормируемое предельное значение которого не должно превышать некоторой величины;

X – вектор заданных элементов, в качестве которых принимаются основные параметры – тип, масса и регламентируемые размерения;

R – вектор параметров и характеристик, отражающих регламентируемые качества и свойства;

P – вектор неизвестных элементов и характеристик.

В наиболее общем случае к множеству I будет относиться баланс масс и соответствие геометрических размеров и формы якоря его проектным чертежам.

Второе множество должно отражать соответствие требованиям химического состава материала, условия прочности, условия пространственного положения лап якоря, различные технологические требования и держащую силу.

Визуальный анализ рисунка 1 показывает, что все судовые якоря повышенной держащей силы состоит из четырёх конструктивных элементов [3]: лапа, веретено, якорная скоба, стопорная планка (или её аналог), которые в «сборе» дают габаритные размеры, рассмотренные выше. Определяющая масса в таком случае рассчитывается выражением

$$M_{\text{я}} = m_{\text{л}} + m_{\text{в}} + m_{\text{ск}} + am_{\text{сп}}, \quad (2)$$

где $m_{\text{л}}$ – масса лап якоря, кг;

$m_{\text{в}}$ – масса веретена якоря, кг;

$m_{\text{ск}}$ – масса якорной скобы, кг;

$m_{\text{сп}}$ – масса стопорной планки, кг;

a – количество стопорных планок, применённых в конструкции.

Массы стопорных планок и якорных скоб много меньше масс двух других элементов и слабо зависят от геометрических размеров, и во многих случаях могут быть унифицированы или государственными стандартами, или стандартами предприятий по выпуску готовой продукции. Как правило, основные проектные решения, при разработке новой размерности судового якоря будут направлены на определения формы веретена и лапы, суммарная масса которых:

$$M'_{\text{я}} = M_{\text{я}} - (m_{\text{ск}} + am_{\text{сп}}) = m_{\text{л}} + m_{\text{в}}. \quad (3)$$

Определение необходимой формы сложных изделий в настоящее время выполняется с применением технологии цифрового двойника [10,11,12,13], основанной на компьютерном моделировании [5-9] и создание пространственной взаимосвязи между регламентируемыми и не регламентируемыми (управляемыми) параметрами, что математически может быть записано в виде системы уравнений

$$m'_{л,в} = \sum_u m_u(a_i, b_j, w_k, \rho), \quad (4)$$

$$z'_{л,в} = m_l^{-1} \sum_u [m_u(a_i, b_j, w_k, \rho) \times z_u(a_i, b_j, w_k)], \quad (5)$$

$$M'_я = m'_л + m'_в$$

где $m'_л, m'_в$ – конструктивные массы лапы и веретена якоря;

$m_u(a_i, b_j, w_k, \rho)$ – масса u -ого элементарного элемента лап, кг;

$z_u(a_i, b_j, w_k)$ – центр тяжести элементарного элемента, м;

a_i – регламентированные параметры лапы якоря;

b_j – нерегламентированные, т.е. «управляемые» проектантом параметры лап якоря;

w_k – пропорциональные размеры якоря.

Масса веретена якоря при моделировании [14] представляется как сумма некоторой постоянной массы (узел крепления скобы, ограничитель наклона веретена) и массы, зависимой от положения оси вращения коробки лап на веретене, которое на рассматриваемых якорях имеет форму усечённой призмы. Так как материал (а именно его плотность) и размеры сечения для веретена известны, то его массу в зависимости от положения оси вращения можно представить уравнением:

$$m_v(z_{оси}) = m'_в + (h_я - z_{оси})b_2^2\rho_я + k_в\pi d_в^2b_2\rho_я, \quad (6)$$

где $m'_в$ – постоянная масса веретена, кг;

$h_я$ – высота якоря, определяемая ГОСТом, мм;

$z_{оси}$ – аппликата оси вращения на веретене, мм;

b_2 – размеры сечения веретена, регламентируемые ГОСТом, мм;

$d_в$ – диаметр оси веретена, мм;

$k_в$ – коэффициент, учитывающий длину оси веретена;

$\rho_я$ – плотность материала якоря, кг/мм³.

Лапы якоря имеют более сложную пространственную форму, которая при трехмерном проектировании описывается набором элементарных фигур: призма, пирамида, цилиндр, сфера и т.д. Фигуры взаимодействуют друг с другом путем объединения или исключения, при этом они могут образовывать отдельные сложные конструктивные части, которые затем объединяются в конечную геометрию.

Таким образом требуемая форма, обеспечивающая выполнения, уравнений (4) и (5), характеризуется объёмом и координатами центра тяжести, определяемыми суммированием отдельных объемов

$$V = \sum_j \left(\xi_j \times \sum_i \zeta_{ij} \times v_{ij} \right). \quad (7)$$

$$Z_V = V^{-1} \times \sum_j \xi_j \times \sum_i \zeta_{ij} \times v_{ij} \times z_{ij} \quad (8)$$

где v_{ij} – i -ый объём, формирующий форму j -ого конструктивного элемента изделия;

z_{ij} – геометрический центр i -ого объёма в j -ом конструктивном элементе изделия;

ζ_{ij} – признак использования i -ого объёма в j -ой конструктивном элементе (фактор суммирования), принимающий значения «+1» при объединении двух объемов и «-1» – при вычитании объема из предыдущего;

ξ_j – признак использования j -ого конструктивного элемента, имеющий тот же смысл, что и ζ_{ij} .

Непосредственно объём и его центр масс при параметрическом моделировании задаются в долях от заданных геометрических характеристик якоря, то есть

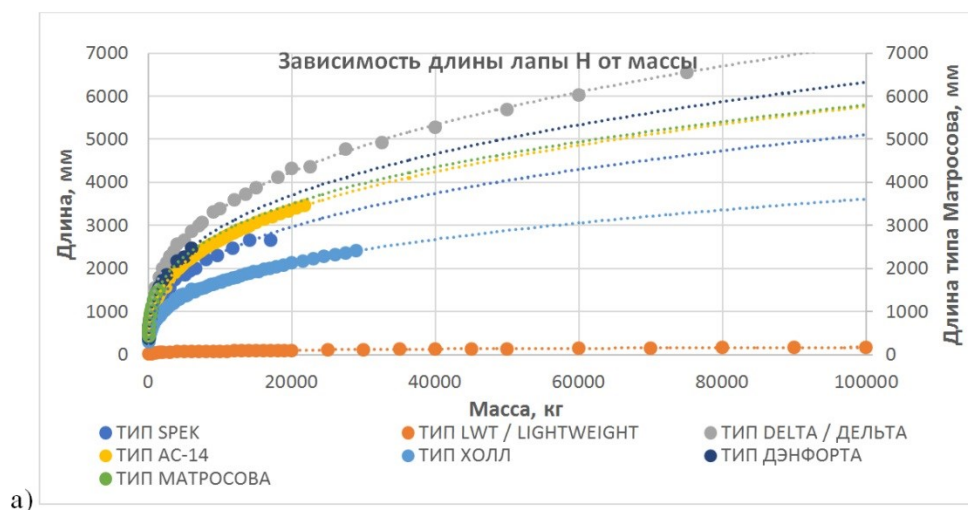
$$v_{ij} = f(H, D, B, L, V, K) \quad (9)$$

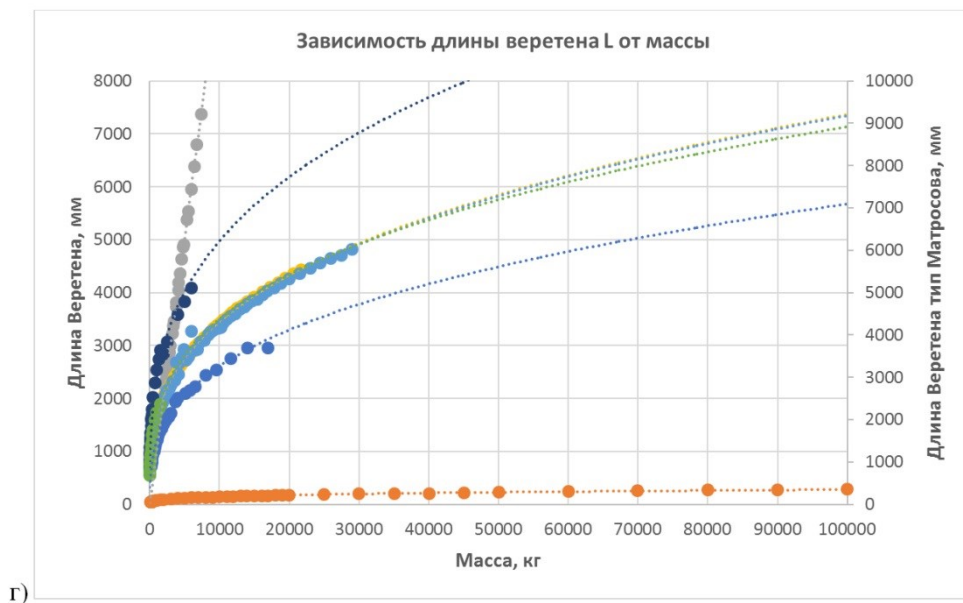
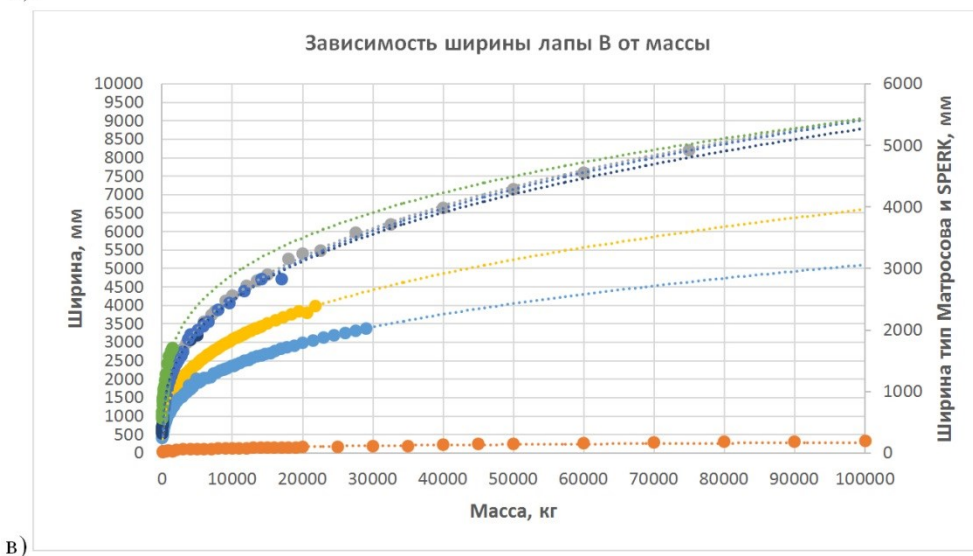
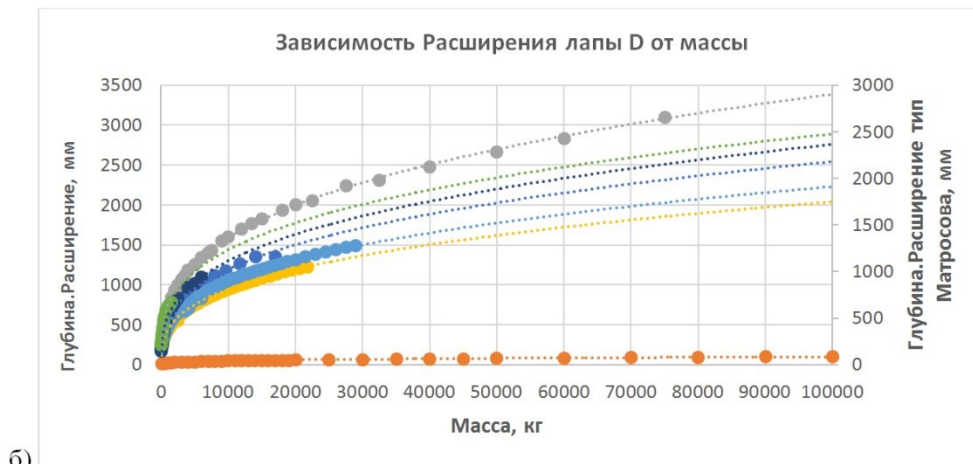
$$z_{ij} = l(H, D, B, L, V, K) \quad (10)$$

где H – длина лапы;
 D – глубина лапы;
 B – ширина лапы;
 L – длина веретена;
 V – расстояние между вершинами лап;
 K – размер плоской части лапы.

Результаты

Требуемые для трёхмерного моделирования нормируемые геометрические размеры [8] могут быть получены регрессионным анализом их распределения от массы якоря (рисунок 2). Диапазон масс, различен для разных типов якорей и составляет: для якоря SPEK от 240 кг до 17000, для LWT от 100 до 100000 кг, для DELTA от 1000 до 75000 кг, для AC-14 от 180 до 21750 кг, для Холла (HALL) от 50 до 29000 кг, для Матросова от 25 – 1500 кг, для Денфорта от 20 до 6000 кг.





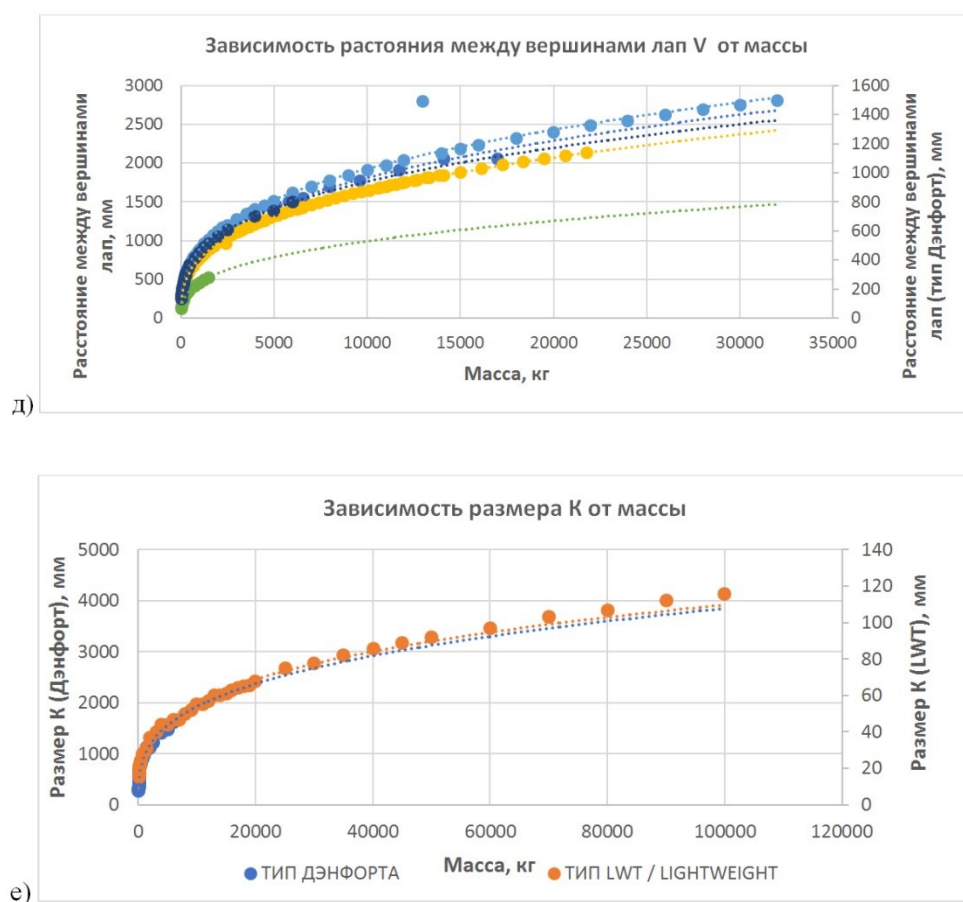


Рис. 2. Зависимость геометрии лапы от его массы.

а) длина лапы Н, б) расширение лапы D в) ширины лапы В г) длины веретена L д) расстояние между вершинами лапы V е) размер плоской части лапы К

Аппроксимация полученного распределения данных наиболее качественно определяется через степенную зависимость

$$x = Am^B \quad (11)$$

где x – один из нормируемых размеров H, D, B, L, V, K ;

A – коэффициент перед массой якоря;

m – масса якоря;

B – коэффициент степени.

Значения коэффициентов A и B для каждого размера и рассматриваемого якоря представленных в таблице 1, а дальнейшее с их помощью моделирование формы лап используя уравнения (7) и (8) представлено в таблице 2.

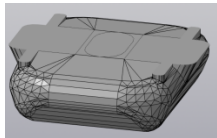
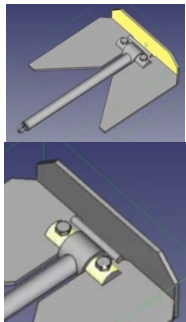
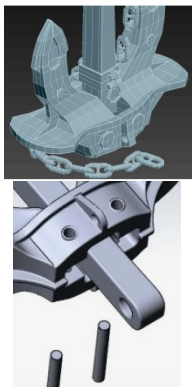
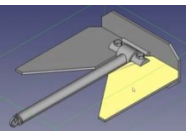
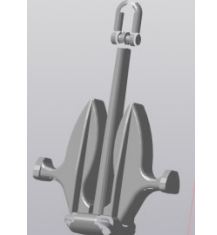
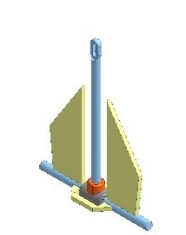
Таблица 1

Коэффициенты размерных зависимостей литых якорей

Зависимости $x = At^B$ / Типы Якорей	ТИП SPEK	ТИП LWT / LIGHTWEIGHT	ТИП DELTA / ДЕЛЬТА	ТИП AC-14	ТИП HALL / ХОЛЛ	ТИП МАТРОСОВА	ТИП ДЭНФОРТА
Зависимость длины лапы H от массы	A=105,28 B=0,3371	A=6,1877 B=0,2881	A=163,8 B=0,3287	A=124,33 B=0,3332	A=83,661 B=0,3273	A=158,42 B=0,3127	A=138,66 B=0,3318
Зависимость глубины лапы D от массы	A=58,416 B=0,3278	A=2,6154 B=0,316	A=76,439 B=0,3294	A=44,115 B=0,3331	A=50,081 B=0,3298	A=75,806 B=0,3029	A=64,42 B=0,3263
Зависимость ширины лапы B от массы	A=111,8 B=0,337	A=8,2272 B=0,309	A=199,87 B=0,3315	A=143,17 B=0,3327	A=110,46 B=0,3329	A=233,79 B=0,2733	A=202,91 B=0,3274
Зависимость длины веретена L от массы	A=145,37 B=0,3377	A=10,185 B=0,2881	A=1 B=1	A=158,99 B=0,3332	A=155,59 B=0,3348	A=253,06 B=0,3094	A=277,05 B=0,3136
Расстояние между вершинами лап якоря V	A=80,764 B=0,3377	-	-	A=76,367 B=0,3333	A=87,181 B=0,3361	A=44,986 B=0,336	A=49,56 B=0,3194
Размеры K - дополнение	-	A=3,8617 B=0,2907	-	-	-	-	A=119,87 B=0,3013
Диапазон масс	240- 17000	100- 100000	1000- 75000	180- 21750	50-29000	25-1500	20-6000

Таблица 2

Этапы формирования модели лапы

Тип операции / Тип якоря	АС-14	Матросова	Дэнфорта и LWT	Хоппа (и SPEK)
Создание коробки лапы: Узел соединения лапы с веретеном; Формирование пустот в коробке				
Создание лап				
Модель лапы				

Обсуждение

Многообразные различных требований к судовому якорю повышенной держащей силы требует применения системного подхода к построению его математической модели и дальнейшему проектированию. Одной из основных задач является определение сложной формы лап и веретена геометрия которых зависит от

габаритных (нормируемых) величин, распределение которых для всех рассматриваемых типов якорей ПДС подчиняется экспоненциальному уравнению. Полученные коэффициенты регрессии, позволяют достаточно быстро, а главное с требуемой на этапе исследовательского проектирования точностью, определять изначально регламентируемые, а затем с применением технологий цифрового прототипа, не регламентируемые элементы якорей.

Применение предложенной методики позволяет за счёт требуемого изменения одного из нормируемых параметров получать фактически новый тип якоря, в котором нуждается непосредственно производство. Данное обстоятельство особенно актуально при разработке судового оборудования для судов, работающих в сложных мореходных условиях, например, для северного морского пути.

Заключение

Разработанная математическая модель позволяет частично автоматизировать разработку судового якоря с применением технологии цифровых прототипов или электронных двойников изделия. Это упрощает как сам процесс проектирования, за счёт исключения большого числа натурных исследований и заменой их численными экспериментами, так и ускоряет сроки изготовления изделий, что бывает крайне важно. Кроме того, при полномасштабном применении указанных технологий, существенно сокращаются ошибки проектирования и тем самым повышается качество судовой продукции.

Список литературы

1. Catalog anchors gigantic inventory used and new with certificates / Anchor Marine Industrial Supply INC. – 28 p. Access mode: URL: https://anchormarinehouston.com/wp-content/uploads/2019/03/Section_1_Anchors.pdf
2. Правила классификации и постройки морских судов. Российского морского регистра судоходства. Часть III Устройства, оборудование и снабжение. – Санкт-Петербург: 2018 – 109 с.
3. Судовые устройства: Справочник / под ред. Александрова М.Н. – Л.: Судостроение, 1987 – 656 с.
4. Никитин Н.Н. Курс теоретической механики. Учеб. для машиностроит. и приборостроит. спец. вузов. – 5е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., - 1990. – 607с.
5. Пенский О.Г. Сопряженные модели проникновения твердых тел // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. №1, 2007 – с. 151 – 161.
6. Велданов В.А. Возможности моделирования проникновения тел в грунтовые среды / В.А. Велданов, А.Ю. Даурских, А.С. Корнейчик, М.А. Максимов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013 – №9. Режим доступа: URL: <http://www.engjournal.ru/catalog/machin/rocket/947.html> - DOI: 10.18698/2308-6033-2013-9-947
7. Котов В.Л. Численное моделирование плоскопараллельного движения конических ударников в грунтовой среде на основе модели локального взаимодействия / В.Л. Котов, А.Ю. Константинов // Вычислительная механика сплошных сред. 2014 – т.7. №3 – с. 225 – 233.
8. Коронатов В.А. Дополнения к элементарной теории проникновения твердого тела в грунтовые среды при однократном и многократном ударе // СИСТЕМЫ. МЕТОДЫ. ТЕХНОЛОГИИ. 2021, №2(50) – с. 42 – 50, DOI: 10.18324/2077-5415-2021-2-42-50
9. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. 8-е изд., перераб. М.: Наука, 1977. – с. 440.
10. Кочнев, Ю. А. Применение аддитивных технологий при исследовании взаимодействия судового якоря с грунтом / Ю. А. Кочнев, И. Б. Кочнева, С. Д. Костерина // Речной транспорт (XXI век). – 2021. – № 4(100). – с. 55-57.
11. Кочнев, Ю. А. Испытания модели судового якоря / Ю. А. Кочнев, С. Д. Костерина // Транспорт. Горизонты развития: Труды 2-го Международного научно-

- промышленного форума, Нижний Новгород, 07–09 июня 2022 года. – Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2022. – с. 86.
12. Кочнев, Ю. А. Влияние геометрических характеристик якоря на держащую силу / Ю. А. Кочнев, С. Д. Костерина // Транспорт. Горизонты развития: Труды 4-го Международного научно-промышленного форума, Нижний Новгород, 23–26 апреля 2024 года. – Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2024. – с. 188.
13. Shin, H.K. Experimental study of embedding motion and holding power of drag embedment type anchor on hard and soft seafloor. / Shin, H.-K., Seo, B.-C., & Lee, J.-H. // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering – 2011. – №3(3)– p. 193–200. doi:10.2478/ijnaoe-2013-0062
14. Роннов, Е. П. Математическая модель судового якоря / Е.П. Роннов, Ю.А. Кочнев // Морские интеллектуальные технологии. – Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2018. – с. 6.

References

1. Catalog anchors gigantic inventory used and new with certificates / Anchor Marine Industrial Supply INC. – 28 p. Access mode: URL: https://anchormarinehouston.com/wp-content/uploads/2019/03/Section_1_Anchors.pdf
2. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Vessels. Russian Maritime Register of Shipping. Part III Devices, Equipment and Supplies. – Saint Petersburg: 2018 – 109 p.
3. Ship devices: Handbook / ed. Aleksandrov M.N. - L.: Sudostroenie, 1987 - 656 p.
4. Nikitin N.N. Course of theoretical mechanics. Textbook for mechanical engineering and instrument making. special. universities. - 5th ed. revised and enlarged. - M.: Higher. school, - 1990. - 607 p.
5. Pensky O.G. Conjugate models of penetration of solids // News of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences. No. 1, 2007 – pp. 151 - 161.
6. Veldanov V.A. Possibilities of modeling the penetration of bodies into soil environments / V.A. Veldanov, A.Yu. Dauriskikh, A.S. Korneichik, M.A. Maksimov // Engineering Journal: Science and Innovation. – 2013 – №9. Access mode: URL: <http://www.engjournal.ru/catalog/machin/rocket/947.html> - DOI: 10.18698/2308-6033-2013-9-947
7. Kotov V.L. Numerical modeling of plane-parallel motion of conical impactors in a soil environment based on a local interaction model / V.L. Kotov, A.Yu. Konstantinov // Computational mechanics of continuous media. 2014 – v.7. №3 – pp. 225 – 233.
8. Koronатов V.A. Supplements to the elementary theory of penetration of a solid body into soil media under single and multiple impacts // SYSTEMS. METHODS. TECHNOLOGIES. 2021, No. 2 (50) – pp. 42 – 50, DOI: 10.18324/2077-5415-2021-2-42-50
9. Sedov L. I. Methods of similarity and dimensionality in mechanics. 8th ed., revised. Moscow: Nauka, 1977. – 440 p.
10. Kochnev, Yu. A. Application of additive technologies in the study of the interaction of a ship's anchor with the ground / Yu. A. Kochnev, I. B. Kochneva, S. D. Kosterina // River transport (XXI century). - 2021. - No. 4 (100). - P. 55-57.
11. Kochnev, Yu. A. Testing a model of a ship's anchor / Yu. A. Kochnev, S. D. Kosterina // Transport. Development Horizons: Proceedings of the 2nd International Scientific and Industrial Forum, Nizhny Novgorod, June 7–9, 2022. – Nizhny Novgorod: Volzhsky State University of Water Transport, 2022. – P. 86.
12. Kochnev, Yu. A. Influence of Anchor Geometrical Characteristics on Holding Force / Yu. A. Kochnev, S. D. Kosterina // Transport. Development Horizons: Proceedings of the 4th International Scientific and Industrial Forum, Nizhny Novgorod, April 23–26, 2024. – Nizhny Novgorod: Volzhsky State University of Water Transport, 2024. – P. 188.
13. Shin, H.K. Experimental study of embedding motion and holding power of drag embedment type anchor on hard and soft seafloor. / Shin, H.-K., Seo, B.-C., & Lee, J.-H. // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering – 2011. – №3(3)– p. 193–200. doi:10.2478/ijnaoe-2013-0062

14. Ronnov, E. P. Mathematical model of a ship's anchor / E. P. Ronnov, Yu. A. Kochnev // Marine intellectual technologies. - Nizhny Novgorod: Volga State University of Water Transport, 2018. - p. 6.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Костерина Софья Дмитриевна, аспирант, факультет судостроения, гидротехники и защиты окружающей среды, кафедра проектирования и технологии постройки судов ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта», 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kocter-c@mail.ru

Sofia D. Kosterina, Postgraduate Student, Faculty of Shipbuilding, Hydraulic Engineering and Environmental Protection, Department of Design and Technology of Ship Construction, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Volga State University of Water Transport», 603951, Nizhny Novgorod, Nesterova St., 5, e-mail: kocter-c@mail.ru

Кочнев Юрий Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры проектирования и технологии постройки судов ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта», 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: tmnnkoch@mail.ru

Yuriy A. Kochnev, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Design and Technology of Ship Construction, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Volga State University of Water Transport», 603951, Nizhny Novgorod, Nesterova St., 5, e-mail: tmnnkoch@mail.ru

Степанова Алла Сергеевна, кандидат филологических наук, доцент, доцент кафедры иностранных языков и конвенционной подготовки ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта», 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: allastepanova@mail.ru

Alla S. Stepanova, Candidate of Philological Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Foreign Languages and Conventional Training of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Volga State University of Water Transport», 603951, Nizhny Novgorod, Nesterova St., 5, e-mail: allastepanova@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16.06.2025; опубликована онлайн 20.09.2025.
Received 16.06.2025; published online 20.09.2025.

УДК 629.12.004.67

DOI: 10.37890/jwt.vi84.616

Выбор вида механических испытаний металлических образцов для построения зависимости микротвёрдости от интенсивности пластической деформации

Ю. Н. Цветков¹

ORCID: 0000-0002-2089-1299

В. А. Петров¹

ORCID: 0009-0005-9392-7909

Н. М. Вихров²

¹ *Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, г. Санкт-Петербург, Россия,*

² *ЗАО «Канонерский судоремонтный завод», г. Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. Проведён сравнительный анализ результатов испытаний на одноосное растяжение и одноосное сжатие металлических образцов для выявления преимуществ и недостатков этих испытаний с точки зрения построения на их основе калибровочной зависимости микротвёрдости от интенсивности пластических деформаций. Были испытаны четыре сплава: техническая медь, латунь Л60, сталь 15 и алюминиево-магниевый сплав АМг5. На сжатие испытывали по 8–12 цилиндрических образцов каждого сплава; сжатие образцов осуществляли до разной степени пластической деформации. После сжатия образцы разрезали или по плоскости, проходящей через ось цилиндров, или перпендикулярно оси сжатого цилиндра посередине его высоты. Испытание на растяжение проводили до разрыва образца; затем половинки разорванных образцов меди, латуни и стали разрезали вдоль оси. Поверхности сечений шлифовали на шкурках разной зернистости, а затем полировали на влажном сукне с добавкой пасты ГОИ. А на разорванных образцах из сплава АМг5 отмечали зону равномерной деформации и разрезали её на столбики с отношением длины к диаметру равном двум, затем полученные столбики подвергали пластической деформации сжатием, деформированные столбики также разрезали по плоскости, проходящей через ось цилиндров, или перпендикулярно оси сжатого цилиндра посередине его высоты, полученные сечения шлифовали и полировали. Провели измерения микротвёрдости поверхности полученных сечений: для сжатых образцов измерения проводили в центре сечений; для разорванных образцов — вдоль оси образца на разных расстояниях от его торца. Микротвёрдость измеряли при трех нагрузках на индентор: 0,196 Н; 0,490 Н и 0,980 Н. Чтобы получить одно значение микротвёрдости, при каждой нагрузке наносили по 6 отпечатков, т. е. всего 18 отпечатков. За окончательный результат брали среднее арифметическое по 18 отпечаткам. Для большинства сплавов для получения адекватной калибровочной зависимости микротвёрдости от интенсивности пластической деформации в области деформаций, не превышающих 0,3, не имеет значения, какой метод испытаний использовать: на одноосное растяжение или одноосное сжатие, при этом следует отдавать предпочтение испытаниям на одноосное сжатие, как менее затратным. В области сравнительно больших пластических деформаций во избежание больших ошибок в оценке распределения деформаций в пластически деформированных металлических деталях по результатам измерения микротвёрдости рекомендуется строить калибровочный график по результатам испытаний на одноосное сжатие.

Ключевые слова: металлический сплав, образцы, одноосное сжатие, одноосное растяжение, интенсивность пластической деформации, сечение образца, шлифование, полирование, микротвёрдость.

Choice of the mechanical testing to plot the dependence of the microhardness of metal on the plastic strain

Yuriy N. Tsvetkov¹

ORCID: 0000-0002-2089-1299

Vasiliy A. Petrov¹

ORCID 0009-0005-9392-7909

Nikolay M. Vihrov²

¹*Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
Saint-Petersburg, Russia,*

²*JSC «KSZ», Saint-Petersburg, Russia*

Abstract. The comparative analysis of the results of the tests on uniaxial compression and uniaxial tension of the metal alloys was carried out. The goal of the analysis was to reveal the advantages and disadvantages of the tests in terms of using them to plot the calibration dependence of microhardness on the plastic strain. There were four alloys tested: copper, brass L60, steel 15 and aluminum-magnesium alloy AMg5. There were from 8 to 12 cylindrical samples tested on uniaxial compression. The compression of each sample was conducted to different strain value. Being compressed the samples were cut either along the section containing the axis of a cylinder, or perpendicularly to the axis of the compressed cylinder in the middle of the cylinder height. The testing on the tension was carried out until failure; then the two parts of the broken specimens of the copper, brass L60 and steel 15 were cut along the axis. The surfaces of the sections was first ground on the abrasive paper of different grit, and then polished on the wet cloth with polishing paste. And on the torn samples of the alloy AMg5 the zone of the uniform deformation was marked and cut into a few cylindrical samples of the length-to-diameter ratio equal to 2, the cylindrical samples were subjected to plastic deformation in uniaxial compression and then the deformed samples were cut either along the section containing the axis of a cylinder, or perpendicularly to the axis of the compressed cylinder in the middle of the cylinder height. The obtained sections were ground and polished. The measurements of the microhardness of the sections obtained were conducted. The measurements for the compressed specimens were performed in the center of the section; for the torn specimens — along the axis on the different distances from the specimen butt. The microhardness was measured using three loads on the indenter: 0,196 N; 0,490 N and 0,980 N. There were produced 6 impressions on each load, that is 18 impressions in all. The final value of microhardness was obtained as mean arithmetical magnitude over 18 impressions. For the most alloys it does not matter which testing to apply — uniaxial compression or uniaxial tension — in order to obtain the calibration dependence of microhardness on the plastic strain for the zone of strain not exceeding 0,3, the uniaxial compression being preferable as less costly. In the area of comparatively high plastic strains to avoid the considerable error in evaluation of the strain distribution in plastically deformed parts according to the microhardness measurements it is recommended to plot the calibration curve based on the uniaxial compression tests.

Keywords: metal alloy, samples, uniaxial compression, uniaxial tension, plastic strain intensity, sample section, grinding, polishing, microhardness

Введение

Метод твёрдости (и микротвёрдости) широко используется в практике испытаний и контроля металлических конструкционных материалов. Это метод относится к неразрушающим, и отличается сравнительно низкими временными и материальными затратами на его реализацию, а поэтому часто используется для определения характеристик механических свойств [1–3], остаточных напряжений [4, 5], показателя упрочнения [6], построения зависимости напряжений от деформаций [7] и многого др. Широко используется метод твёрдости и микротвёрдости также для оценки распределения деформаций и напряжений в пластически деформированных металлических деталях [8, 9, 10]; особенно полезным в этом отношении метод

микротвёрдости может оказаться для оценки пластических деформаций поверхностных слоёв металлических деталей при гидроабразивном или кавитационном изнашивании [11, 12]. Определение пластических деформаций изношенных деталей методом микротвёрдости может оказаться очень востребованным в судоремонте, так как позволит оценить механизм разрушения поверхности при изнашивающем воздействии и предложить обоснованно технологию ремонта. Для реализации метода микротвёрдости необходимо располагать калибровочными графиками зависимости микротвёрдости от интенсивности пластической деформации. Калибровочные графики строят по результатам предварительных испытаний образцов из того же материала, что и исследуемая деталь: образцы пластически деформируют с разной степенью деформации, а потом измеряют их микротвёрдость. Это самая трудоёмкая часть реализации метода микротвёрдости, поэтому получили развитие также и аналитические методы построения зависимости микротвёрдости от интенсивности пластической деформации [13–15]. Тем не менее, экспериментальный метод построения калибровочной зависимости является наиболее надёжным, но здесь остаётся ещё много вопросов, требующих однозначных ответов.

Согласно основной гипотезе теории упруго-пластических деформаций гипотезе единой кривой — интенсивность напряжений является функцией интенсивности деформаций, не зависящей от типа напряжённого состояния. Эта гипотеза подтверждается многочисленными экспериментами, обзор которых представлен в работе [16]. По аналогии обосновано полагать, что и зависимость твёрдости (микротвёрдости) от интенсивности пластической деформации является для конкретного металла единой, не зависящей от схемы напряжённого состояния; имеющиеся данные, полученные по результатам испытаний различных сплавов в условиях разных типов напряжённого состояния [8] не противоречат этому положению.

Наиболее простыми и методически отработанными являются механические испытания на одноосное растяжение и одноосное сжатие. Именно эти виды испытаний целесообразно применять для получения калибровочных зависимостей. Тем не менее в научной литературе отсутствуют рекомендации в отношении использования этих двух методов для построения зависимости микротвёрдости от интенсивности пластической деформации.

Цель работы: сравнительный анализ результатов испытаний на одноосное растяжение и одноосное сжатие металлических образцов для выявления преимуществ и недостатков этих испытаний с точки зрения построения на их основе калибровочной зависимости микротвёрдости от интенсивности пластических деформаций.

Методика экспериментов

Для проведения экспериментов выбрали четыре сплава: техническую медь МЗ, латунь Л60, низкоуглеродистую сталь (сталь 15) и алюминий-магний-магний сплав АМг5.

Химический состав меди соответствовал ГОСТ 859–2014, латуни — ГОСТ 15527–2004, стали — ГОСТ 1050–2013, а алюминий-магний-магний сплава АМг5 — ГОСТ 4784–97.

Исходное состояние материалов и их термообработка перед тем, как из них изготавливали образцы, указаны в табл. 1. Образцы из стали 15 вырезали из изношенной при гидроабразивном воздействии форсунки струйного насоса земснаряда, которая были изготовлена из катаного прутка соответствующего диаметра.

Таблица 1

Термообработка и характеристики пластичности испытанных металлических материалов

Материал	Исходное состояние	Термообработка
Медь техническая МЗ	Катаный пруток Ø16	Отжиг при 700 °С
Латунь Л60	Катаный пруток Ø16	Отжиг при 650 °С
Сталь 15	Катаный пруток	Состояние поставки
Алюминиевый сплав АМг5,0	Катаный пруток Ø16	Отжиг при 310 °С

Материалы медь МЗ, латунь Л60 и сталь 15 испытывали при двух видах нагружения: на одноосное сжатие и на одноосное растяжение, а сплав АМг5 — при одноосном сжатии, одноосном растяжении и комбинированном нагружении, состоящим из двух стадий: одноосного растяжения и последующего сжатия образцов, деформированных при одноосном растяжении.

Одноосное сжатие проводили на образцах в форме цилиндров: образцы из технической меди, латуни Л60 и сплава АМг5 имели диаметр 16 мм и высоту 24 мм; образцы из стали были диаметром 12 и высотой 18 мм. Сжатие осуществляли на прессе. На торцевые поверхности сжимаемых цилиндров, контактирующих со сжимающими поверхностями прессы, наносили смазочный материал «Литол-24» для снижения трения и уменьшения бочкообразности сжатых цилиндров. Для каждого сплава изготавливали 8–12 цилиндрических образцов, каждый из которых пластически деформировали сжатием до разной высоты.

После сжатия образцы разрезали по двум вариантам (рис. 1): 1) образцы из меди и стали 15 по плоскости, проходящей через ось цилиндров; 2) образцы из латуни Л60 и сплава АМг5 перпендикулярно оси сжатого цилиндра посередине его высоты. Поверхность сечений шлифовали на шкурках разной зернистости, а затем полировали на влажном сукне с добавкой пасты ГОИ.

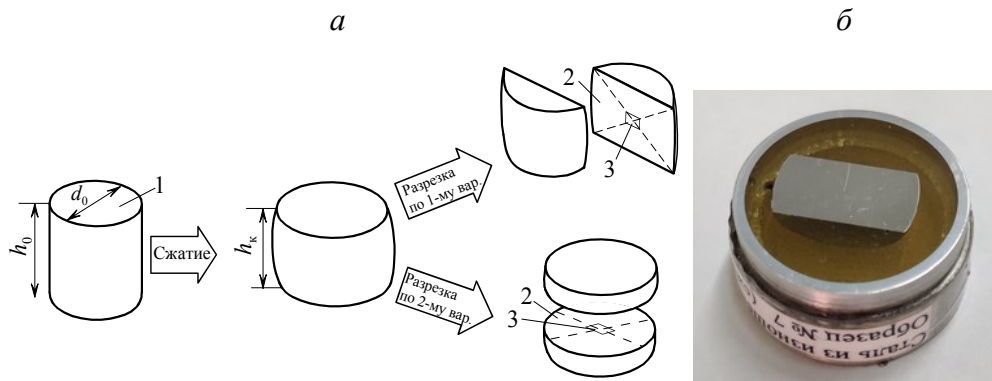


Рис. 1. Схемы разрезки образцов (а) и общий вид шлифа (б), подготовленного из стального образца, сжатого и разрезанного по первому варианту

Испытания на одноосное растяжение проводили на образцах, изготовленных по рекомендациям ГОСТ 1497-84, с отношением рабочей длины к диаметру, равным пяти. Диаметр образцов из меди и сплава АМг5 равнялся 5,0 мм, а стали 15 и латуни Л60 — 6,0 мм. В экспериментах с медью МЗ, латунью Л60 и сталью 15 две половинки разорванного образца устанавливали в форме в горизонтальном положении, заливали эпоксидным компаундом так, чтобы его уровень проходил по оси образца и после отверждения компаунда аккуратно отрезали выступающую над компаундом части

половинок, и образовавшееся сечение шлифовали и полировали по той же методике, что использовалась для сжатых образцов (рис. 2).

Измерения проводили на приборе ПМТ-3 при 3-х нагрузках на индентор: 0,196 Н; 0,490 Н и 0,980 Н, соответствующих массам грузиков 20 г, 50 г и 100 г. При каждой нагрузке наносили по 6 отпечатков, т. е. всего по 18 отпечатков на каждый образец. За окончательный результат брали среднее арифметическое по 18 отпечаткам.

На образцах, деформированных сжатием, измерения микротвёрдости поверхности 2 проводили в районе 3, располагающемся в центре сечения (рис. 1 а), чтобы исключить влияние на микротвёрдость отклонений от одноосного напряжённого состояния, имеющих место в тех районах образца, которые примыкали к торцевым и цилиндрическим поверхностям цилиндров [8, 17].

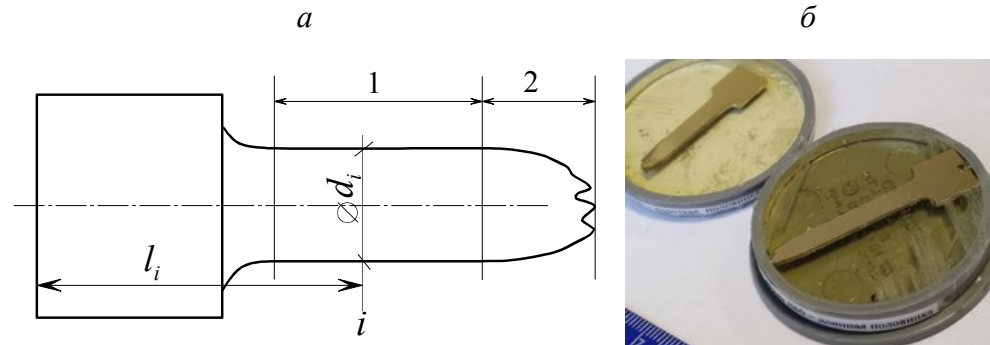


Рис. 2. Схема обмера половинок разорванного образца (а) и шлифы двух половинок образца из латуни Л60 (б): 1 — зона равномерной деформации образца; 2 — зона шейки

Измерения микротвёрдости поверхности сечения разорванных образцов проводили на разном расстоянии l_i от торца образца (рис. 2 а).

Если в каждом i -м сечении разорванных образцов (рис. 2 а) выделить цилиндрический микроэлемент, ось которого совпадает с осью образца, то его деформированное состояние характеризуется тремя главными деформациями: осевой ϵ_1 ; радиальной ϵ_r и окружной ϵ_θ . Причём деформированное состояние является осесимметричным, т. е. $\epsilon_r = \epsilon_\theta$. А значит с учётом того, что объём металла при пластической деформации не изменяется, можно записать что

$$\epsilon_1 + \epsilon_r + \epsilon_\theta = 0$$

или

$$\epsilon_1 = -\epsilon_r - \epsilon_\theta = -2\epsilon_\theta = -2\epsilon_r.$$

Тогда интенсивность деформации можно рассчитать следующим образом:

$$\begin{aligned} e_i &= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_\theta)^2 + (\epsilon_1 - \epsilon_r)^2 + (\epsilon_r - \epsilon_\theta)^2} = \\ &= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(-2\epsilon_r - \epsilon_r)^2 + (-2\epsilon_r - \epsilon_r)^2 + (\epsilon_r - \epsilon_r)^2} = \\ &= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{18\epsilon_r^2} = 2\epsilon_r = \epsilon_1. \end{aligned} \quad (1)$$

Формула (1) действительна также для расчёта интенсивности деформации сжатых образцов.

Для образцов, испытанных на растяжение, интенсивность деформаций в i -м сечении, следуя выражению (1), удобно находить по значению радиальной

деформации, так как она рассчитывается по диаметру i -го сечения образца, который легко измерить:

$$e_i = 2\varepsilon_r = 2\ln(d_0/d_i), \quad (2)$$

где d_0 — диаметр сечения рабочей части образца до испытаний; d_i — диаметр i -го сечения рабочей части образца после испытания (рис. 2 а).

Для образцов, испытанных на сжатие, интенсивность деформаций в центре каждого сжатого образца, следуя выражению (1), удобно находить по значению осевой деформации, так как она рассчитывается по высоте сжатого образца, которую легко измерить:

$$e_i = \varepsilon_l = -\ln(h_k/h_0), \quad (3)$$

где h_0 — высота цилиндрического образца до испытаний; h_k — высота цилиндрического образца после сжатия (рис. 1 а).

В экспериментах на комбинированное нагружение алюминий-магниевого сплава АМг5 сначала проводили опыты на одноосное растяжение образцов, а затем зону равномерной деформации (зона 1 на рис. 2 а) разорванных образцов разрезали на цилиндрические столбики с отношением длины к диаметру равным примерно 2, и полученные столбики сжимали на прессе до разной степени пластической деформации. Всего получили шесть столбиков, итоговую деформацию которых (табл. 2) определяли суммированием

Таблица 2

Результаты расчёта суммарной пластической деформации образцов из сплава АМг5 при комбинированном нагружении

Условный номер вырезанного столбика	Деформация растяжением (зона 1, рис. 2 а)	Деформация сжатием столбиков	Суммарная деформация
1	0,167	0,363	0,530
2	0,149	0,144	0,293
3	0,115	0,815	0,930
4	0,157	0,955	1,112
5	0,183	0,577	0,760
6	0,123	0,509	0,632

деформации, полученной при одноосном растяжении, вычисляемой по формуле (1), с деформацией, полученной при сжатии, рассчитываемой по формуле (2). Затем деформированные столбики разрезали по схеме рис. 1 (а), шлифовали и полировали полученные сечения и измеряли микротвёрдость по описанной выше методике.

Результаты экспериментов

Ниже на графиках рис. 3–6 представлены зависимости микротвёрдости H_μ от интенсивности деформации e_i для испытанных сплавов. Как видно, для всех сплавов кроме АМг5 можно принять, что все точки объединённого массива, т. е. включающего точки, полученные при сжатии и растяжении образцов, группируются вокруг единой степенной зависимости следующего вида:

для меди: $H_\mu = 1041 - 522 \cdot e_i^{-0,111}$,

для стали 15: $H_\mu = 3312 - 1338 \cdot e_i^{-0,102}$,

для латуни Л60: $H_\mu = 2232 - 1073 \cdot e_i^{-0,133}$.

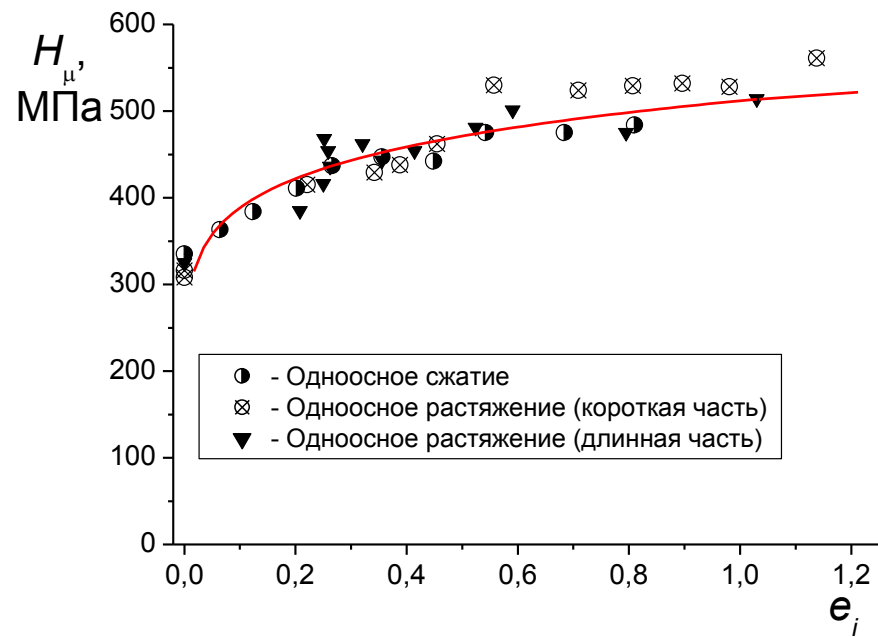


Рис. 3. Зависимость микротвёрдости образцов технической меди от интенсивности их пластической деформации

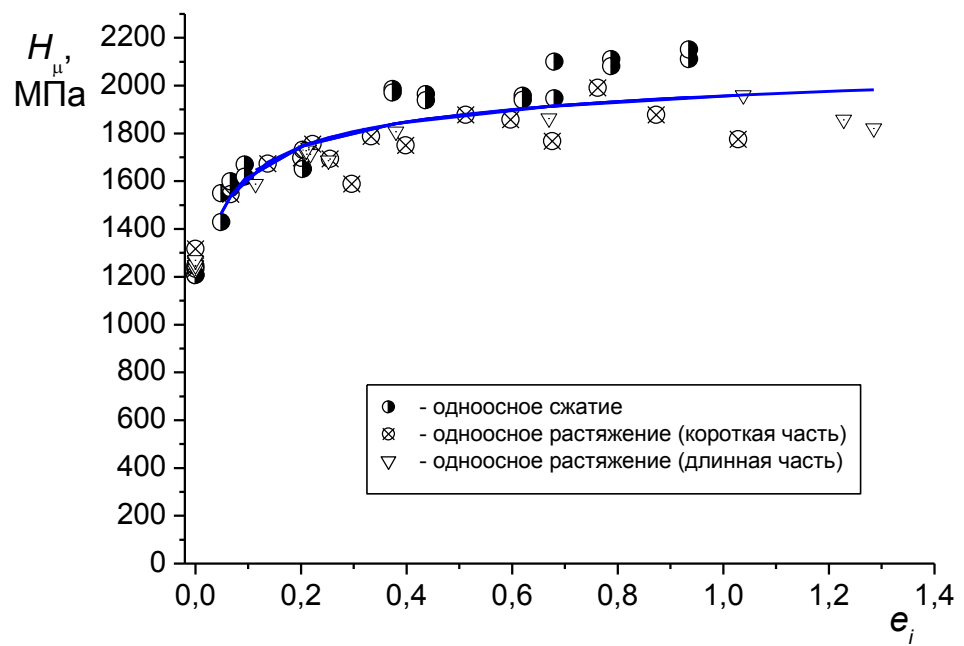


Рис. 4. Зависимость микротвёрдости образцов из стали 15 от интенсивности их пластической деформации

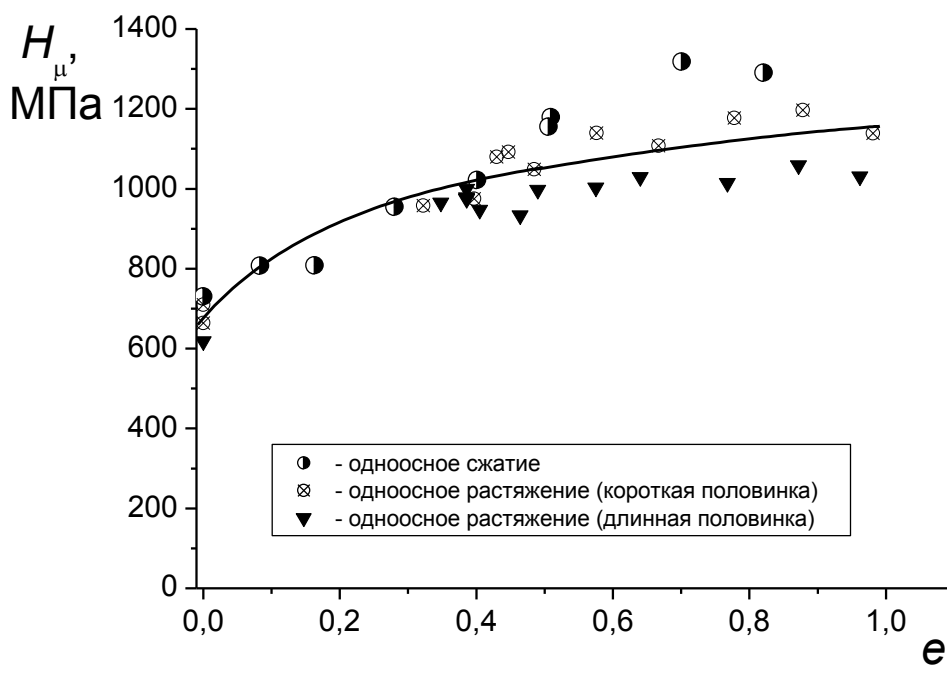


Рис. 5. Зависимость микротвёрдости образцов из латуни Л60 от интенсивности их пластической деформации

На рис. 3–5 показан графический вид перечисленных выше аппроксимирующих функций. Дальнейший анализ показал, что для меди, латуни и стали в целом до значения деформации, равного примерно 0,3, расположение точек, полученных из опытов на одноосное растяжение, согласуется с положением точек, полученных из опытов на одноосное сжатие. Для меди в зоне высоких пластических деформаций (превышающих 0,3) точки, соответствующие одноосному растяжению, располагаются чуть выше точек, полученных при сжатии образцов, однако для меди это разница не превышает 10 %, и, по всей видимости, носит случайный характер. Для латуни (рис. 3) и стали (рис. 4), наоборот, в зоне больших пластических деформаций деформация сжатием приводит к большему упрочнению, чем деформация растяжением.

То, что в зоне больших пластических деформаций прослеживаемая тенденция расслоения точек, полученных при одноосном растяжении и одноосном сжатии, является неслучайной, подтверждается опытами на сплаве АМг5 (рис. 6). При исследовании сплава АМг5 сначала были построены зависимости $H_{\mu}(e_i)$ по результатам одноосного сжатия и одноосного растяжения. Однако по результатам указанных опытов в отличие от меди, стали и латуни получились совершенно разные зависимости $H_{\mu}(e_i)$, которые невозможно аппроксимировать единой функцией. Для выяснения причин этого были проведены опыты при комбинированном нагружении (табл. 2).

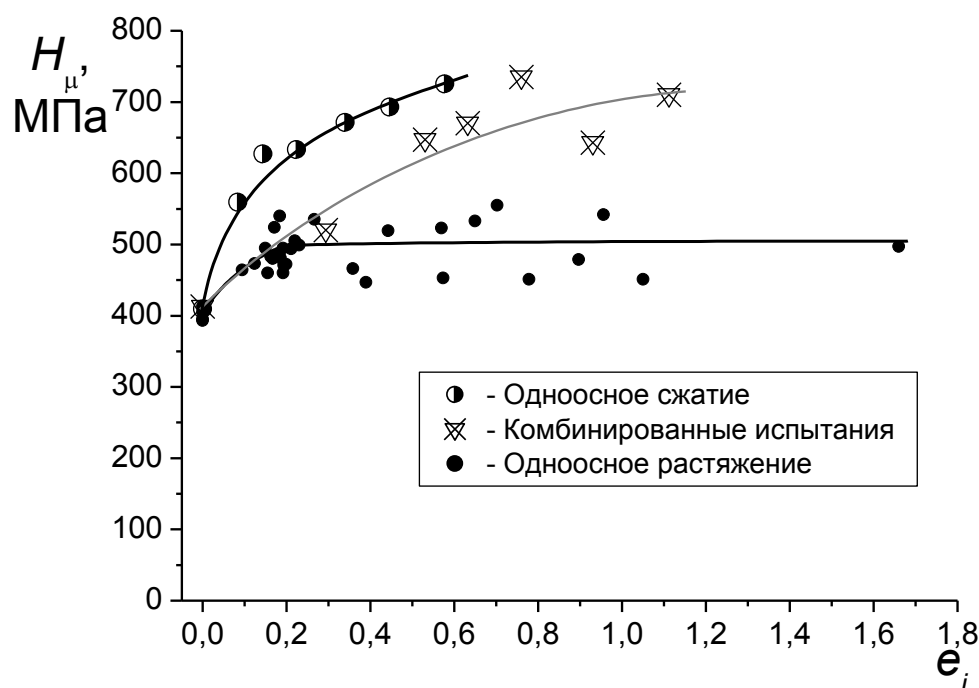


Рис. 6. Зависимость микротвёрдости образцов из сплава АМг5 от интенсивности их пластической деформации

Как видно из рис. 6, зависимости $H_\mu(e_i)$, полученные при комбинированном нагружении и при одноосном растяжении практически совпадают на начальном участке, т. е. до значения $e_i \approx 0,18$. Это значение примерно равно начальной деформации, полученной растяжением при комбинированном нагружении (табл. 2). Затем при деформациях $e_i > 0,18$ зависимость $H_\mu(e_i)$, соответствующая растяжению, идёт параллельно оси абсцисс, а зависимость, соответствующая комбинированному нагружению, располагается выше, т. е. при сравнительно больших деформациях упрочнение в опытах на одноосное растяжение прекращается, а в опытах на комбинированное нагружение оно продолжается, так как дальнейший прирост деформаций происходил при одноосном сжатии.

Так как зависимости $H_\mu(e_i)$ являются нелинейными, то для оценки степени тесноты группирования точек относительно аппроксимирующей кривой рассчитывали коэффициенты множественной корреляции¹ (табл. 3). Причём коэффициенты множественной корреляции рассчитали для меди, латуни и стали отдельно для зависимости, получаемой по результатам опытов на сжатие, отдельно — по результатам опытов на растяжение, и наконец, отдельно — для случая аппроксимации объединённого массива экспериментальных точек, в который включили точки, полученные по результатам опытов как на сжатие, так и на растяжение (табл. 3), чтобы оценить возможность построения кривой $H_\mu(e_i)$ при разных схемах нагружения. Для сплава АМг5 таких расчётов не проводили, так как для сплава АМг5 очевидно без привлечения методов статистической обработки, что опыты на одноосное растяжение и опыты на одноосное сжатие дают разные кривые $H_\mu(e_i)$ (рис. 6).

¹ Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. — Л.: Энергоатомиздат, 1991. — 304 с.

Таблица 3

Значения коэффициента множественной корреляции для зависимостей $H_{\mu}(e_i)$, получаемых по результатам обработки разных массивов данных

Сплав	Испытания на сжатие	Испытания на растяжение	Объединённый массив данных
Медь техн.	0,990	0,956	0,949
Латунь Л60	0,981	0,925	0,882
Сталь низкоуглеродистая	0,977	0,968	0,939

Как видно из табл. 3, самые высокие значения коэффициента множественной корреляции получаются для зависимостей $H_{\mu}(e_i)$, построенных по результатам опытов на сжатие. Для зависимостей $H_{\mu}(e_i)$, построенных по результатам опытов на растяжение, значения коэффициента множественной корреляции меньше, что обусловлено большей трудоёмкостью проведения измерений на образцах, полученных в результате испытаний на одноосное растяжение, и, как следствие, большим количеством действующих случайных факторов, увеличивающих погрешность результатов измерений. Если бы точки, полученные по результатам опытов на сжатие и на растяжение, формировали единую зависимость $H_{\mu}(e_i)$, то значение коэффициента множественной корреляции для зависимости $H_{\mu}(e_i)$, построенной по объединённому массиву точек (см. последний столбец табл. 3), находилось бы между значениями, полученными для опытов на сжатие и опытов на растяжение. Однако, для всех сплавов значения в последнем столбце табл. 3 ниже значений во втором и третьем столбцах, что указывает на то, что по результатам опытов на сжатие и опытов на растяжение формируются разные зависимости $H_{\mu}(e_i)$. По всей видимости, различия в кривых $H_{\mu}(e_i)$, полученных при разных схемах нагружения, для некоторых материалов, таких как техническая медь, несущественные, для других, таких как латунь и низкоуглеродистая сталь, возможность пренебречь этими различиями определяется решаемыми задачами. И, наконец, для таких сплавов, как АМг5, пренебрегать различием в кривых $H_{\mu}(e_i)$, полученных при сжатии и растяжении, нельзя, и надо обдуманно подходить к выбору схемы испытаний.

Таким образом, разные сплавы реагируют по-разному на изменение схемы напряжённого состояния с точки зрения её влияния на положение зависимости $H_{\mu}(e_i)$. Метод микротвёрдости показывает, что при испытании на одноосное растяжение степень увеличения микротвёрдости при превышении пластической деформацией какого-то небольшого начального значения (для низкоуглеродистой стали и латуни Л60 это значение равно примерно 0,3, а для сплава АМг5 примерно 0,2) снижается (сталь, латунь) или увеличение прекращается вообще (алюминиево-магниевый сплав). Причину этого можно предположить в следующем. При испытании металлических образцов на одноосное растяжение в области шейки реализуются большие значения деформации (рис. 7), при этом в области шейки возникает трёхосное растяжение. Как известно, пластичность металла зависит от схемы напряжённого состояния [17, 18], при равноосном растяжении пластическая деформация невозможна [16]. В области шейки $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$, тем не менее и в этом случае при такой схеме напряжённого состояния протекание пластической деформации очень затруднено. В работе [19] отмечается, что при большом значении коэффициента напряжённого состояния, т. е. при большой доле растягивающих напряжений в схеме, пластическая деформация и последующее разрушение металла происходит путём образования пустот, роста их размера и слияния, тогда как при малом значении коэффициента напряжённого состояния, т. е. когда на напряжённое состояние накладывается равноосное сжатие, механизм пластической деформации состоит в деформации сдвига перемычек между пустотами, при этом размер пустот очень мал, а их рост очень ограничен. Эксперименты на сталях показали [19], что при большом значении коэффициента

напряжённого состояния средний размер образующихся в процессе разрушения пустот составляет 20 мкм и в 4 раза превышает размер пустот, образующихся при разрушении в условиях, благоприятствующих пластической деформации, т. е. при малых значениях коэффициента напряжённого состояния. Отмечено, что границы раздела фаз, при большой разнице в их механических свойствах, могут служить центрами зарождения пустот.

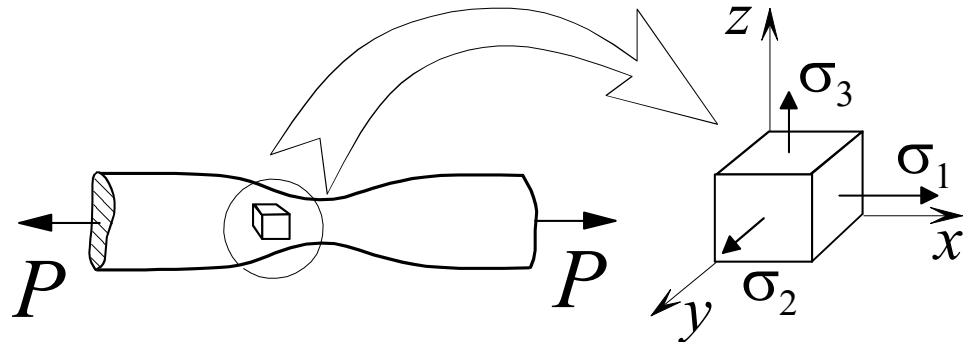


Рис. 7. Напряжённое состояние металла в области шейки, образующейся при растяжении образца

Таким образом, в объёмах, расположенных в шейке образца, может происходить образование пустот и разрыхление материала, проявляющееся у разных сплавов в разной степени, а соответственно в разной степени это будет сказываться и на значении микротвёрдости указанных микрообъёмов.

Среди испытанных четырёх металлических материалов наименьшую чувствительность к изменению схемы напряжённого состояния показала отожжённая медь, отличающаяся очень высокой пластичностью. Поэтому для меди, похоже, не имеет значения, по какой схеме испытывать образцы для построения калибровочной зависимости $H_\mu(e_i)$. Для низкоуглеродистой стали и латуни заменять опыты на одноосное сжатие опытами на одноосное растяжение для построения графиков $H_\mu(e_i)$ можно только в области сравнительно невысоких значений пластической деформации. А чтобы построить калибровочные графики $H_\mu(e_i)$ для алюминиево-магниевого сплава проводить испытания на одноосное растяжение не рекомендуется.

Заключение

Для большинства сплавов для получения адекватной калибровочной зависимости микротвёрдости H_μ от интенсивности пластической деформации e_i в области сравнительно небольших деформаций (примерно до 0,3) не имеет значения, какой метод испытаний использовать: на одноосное растяжение или одноосное сжатие. Для повышения точности получаемой аппроксимации представляется обоснованным, чтобы количество точек, по которым необходимо строить зависимость $H_\mu(e_i)$, было не менее 10. При этом с точки зрения трудоёмкости более предпочтительным являются испытания на одноосное сжатие. Несмотря на то, что для этого требуется большое количество образцов, так как один образец обеспечивает получение одной экспериментальной точки, простота подготовки образцов, и отсутствие необходимости точной выверки образца на столике микротвердомера, делает этот вид испытаний предпочтительным.

В области сравнительно больших пластических деформаций (начиная, примерно с 0,3 и выше) во избежание больших ошибок в оценке распределения деформаций в пластически деформированных металлических деталях по результатам измерения

микротвёрдости настоятельно рекомендуется строить калибровочный график $H_\mu(e_i)$ по результатам испытания на сжатие.

Для некоторых сплавов, таких как алюминиево-магниевый сплав АМг5, разные схемы испытаний дают разные калибровочные зависимости $H_\mu(e_i)$, поэтому для таких сплавов для получения зависимости $H_\mu(e_i)$ следует проводить испытания на одноосное сжатие. Отмеченное поведение сплава АМг5 требует отдельного изучения.

Список литературы

1. Genov G. Revisiting the rule-of-thumb dependencies of the shear strength and the hardness on the yield and the ultimate strengths // Technical Report. 2020. 7 p. DOI:10.13140/RG.2.2.24105.72807.
2. Zhang Ch., Li F., Wang B. Estimation of the elasto-plastic properties of metallic materials from micro-hardness measurements // Journal of material science. 2013. Vol. 48. P. 4446–4451. doi 10.1007/s10853-01307263-3.
3. Goanta V. Plastic deformation degree based on Vickers hardness test near the fractured surfaces for determining J1C / Proceedings of the 5th International Conference on Integrity-Reliability-Failure. Topic C: Fracture and Fatigue. 2016. Paper ref. 6207. P. 165–178.
4. Jang J. Estimation of residual stress by instrumented indentation: A review // Journal of Ceramic Processing Research. 2009. Vol. 10. No 3. P. 391–400.
5. Цветков Ю. Н. Разложение остаточных напряжений в стальных напыленных покрытиях на структурную и термическую составляющие методом микротвёрдости // Заводская лаборатория. Диагностика материалов / 2005. Т. 71. № 10. С. 46-50.
6. Kim J.-Y., Kang S.-K., Greer J. R., Kwon D. Evaluating plastic flow properties by characterizing indentation size effect using a sharp indenter // Acta Materialia. 2008. Vol. 56. P. 3338–3343. doi:10.1016/j.actamat.2008.02.049.
7. Branch N. A., Subhash G., Arakere N. K., Klecka M. A. A new reverse analysis to determine the constitutive response of plastically graded case-hardened bearing steels // International Journal of Solids and Structures. 2011. Vol. 48. P. 584–591. doi:10.1016/j.ijsolstr.2010.10.023.
8. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твёрдости. М.: Машиностроение, 1971. 199 с.
9. Yu X., Qiao D., Crooker P., David S., Feng Zh. Measurements of plastic strain distribution in dissimilar metal weld by microhardness mapping // Proceedings of the ASME 2014 Pressure Vessels and Piping Conference. 2014, Anaheim, California, USA. P. 1–4.
10. Орешко Е. И., Яковлев Н. О., Ерасов В. С., Уткин Д. А. Исследование пластической деформации металла методом индентирования // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88, №2. С. 64–70. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-2-64-70>.
11. Погодаев Л. И., Шевченко П. А. Гидроабразивный и кавитационный износ судового оборудования. Л.: Судостроение, 1984. 263 с.
12. Цветков Ю. Н., Погодаев Л. И. Напряжённое состояние металлов при изнашивающем воздействии абразива. СПб.: СПбГУВК, 2004. 94 с.
13. Robinson J. N., Shabaik A. H. The determination of the relationship between strain and microhardness by means of viscoplasticity // Metallurgical transactions. 1973. Vol. 4. P. 2091–2095.
14. Sonmez F. O., Demir A. Analytical relations between hardness and strain for cold formed parts // Journal of Material Processing Technology. 2007. Vol. 186. P. 163–173. doi: 10.1016/j.jmatprote.2006.12.031.
15. Ramaekers J. A. H., Veenstra P. C. The relation between effective deformation and microhardness in a state of large plastic deformation // Annals of the C.I.R.P. 1970. Vol. XVIII. P. 541–545.
16. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1975. 400 с.
17. Смирнов-Аляев Г. А. Механические основы пластической обработки металлов. Л.: Машиностроение, 1968. 272 с.
18. Вичужанин Д. И., Шихов С. Е., Смирнов С. В., Чурбаев Р. В. Влияние напряженного состояния на предельную пластичность медной катанки М00К // Известия вузов.

Цветная металлургия. 2015. №5. С. 39–45.

DOI: [dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2015-5-39-45](https://doi.org/10.17073/0021-3438-2015-5-39-45).

19. Zhang X. W., Wen J. F., Zhang X. C., Wang X. G., Tu S. T. Effects of the stress state on plastic deformation and ductile failure: Experiment and numerical simulation using a newly designed tension-shear specimen // *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2019. P. 1–14. DOI: 10.1111/ffe.13084.

References

1. Genov G. Revisiting the rule-of-thumb dependencies of the shear strength and the hardness on the yield and the ultimate strengths // Technical Report. 2020. 7 p. DOI:10.13140/RG.2.2.24105.72807.
2. Zhang Ch., Li F., Wang B. Estimation of the elasto-plastic properties of metallic materials from micro-hardness measurements // *Journal of material science*. 2013. Vol. 48. P. 4446–4451. doi 10.1007/s10853-01307263-3.
3. Goanta V. Plastic deformation degree based on Vickers hardness test near the fractured surfaces for determining J_{IC} / *Proceedings of the 5th International Conference on Integrity-Reliability-Failure. Topic C: Fracture and Fatigue*. 2016. Paper ref. 6207. P. 165–178.
4. Jang J. Estimation of residual stress by instrumented indentation: A review // *Journal of Ceramic Processing Research*. 2009. Vol. 10. No 3. P. 391–400.
5. Tsvetkov Y. N. Decomposition of the residual stresses in steel sprayed coatings into the structural and thermal components using the microhardness method // *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials* / 2005. Vol. 71. No. 10. P. 46–50. (In Russ).
6. Kim J.-Y., Kang S.-K., Greer J. R., Kwon D. Evaluating plastic flow properties by characterizing indentation size effect using a sharp indenter // *Acta Materialia*. 2008. V. 56. P. 3338–3343. doi:10.1016/j.actamat.2008.02.049.
7. Branch N. A., Subhash G., Arakere N. K., Klecka M. A. A new reverse analysis to determine the constitutive response of plastically graded case-hardened bearing steels // *International Journal of Solids and Structures*. 2011. Vol. 48. P. 584–591. doi:10.1016/j.ijsolstr.2010.10.023.
8. Del, G.D. *Opredeleaniye napryazheniy v plasticheskoy oblasti po raspredeleniyu tverdosti* [Determination of stresses in plastic area by hardness distribution]. M.: Mashinostroyeniye, 1971. 199 p. (In Russ).
9. Yu X., Qiao D., Crooker P., David S., Feng Zh. Measurements of plastic strain distribution in dissimilar metal weld by microhardness mapping // *Proceedings of the ASME 2014 Pressure Vessels and Piping Conference*. 2014. Anaheim, California, USA. P. 1–4.
10. Oreshko E. I., Yakovlev N. O., Erasov V. S., Utkin D. A. Study of the plastic deformation of metals by indentation method // *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2022. Vol. 88. No. 2. P. 64–70. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-2-64-70> (In Russ.)
11. Pogodayev, L.I., Shevchenko, P.A. *Gidroabrasivny i kavitatsionnyi iznos sudovogo oborudovaniya* [Hydroabrasive and cavitation wear of ship equipment]. L.: Sudostroyeniye, 1984. 263p. (In Russ).
12. Tsvetkov Y. N., Pogodayev, L. I. Stressed state of metals in wearing impact of abrasives. SPb.: SPbGUVK, 2004. 94 p.
13. Robinson J. N., Shabaik A. H. The determination of the relationship between strain and microhardness by means of visioplasticity // *Metallurgical transactions*. 1973. Vol. 4. P. 2091–2095.
14. Sonmez F. O., Demir A. Analytical relations between hardness and strain for cold formed parts // *Journal of Material Processing Technology*. 2007. Vol. 186. P. 163–173. doi: 10.1016/j.jmatprote.2006.12.031.
15. Ramaekers J. A. H., Veenstra P. C. The relation between effective deformation and microhardness in a state of large plastic deformation // *Annals of the C.I.R.P.* 1970. Vol. XVIII. P. 541–545.
16. Malinin N. N. *Applied theory of plasticity and creeping*. M.: Mashinostroyeniye, 1968. 400 p. (In Russ).
17. Smirnov-Alyayev, G. A. *Mekhanicheskkiye osnovi plasticheskoy obrabotki metallov* [Mechanical basis of plastic metalworking]. L.: Mashinostroyeniye, 1968. 272 p. (In Russ).
18. Vichuzhanin D. I., Shihov S. E., Smirnov S. V., Churbayev R. V. V. Influence of the stressed state on the limiting plasticity of M00K copper rolled wire // *Izvestiya vuzov*.

- Tsvetnaya metallurgiya. 2015. No. 5. P. 39–45 DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2015-5-39-45. (In Russ).
19. Zhang X. W., Wen J. F., Zhang X. C., Wang X. G., Tu S. T. Effects of the stress state on plastic deformation and ductile failure: Experiment and numerical simulation using a newly designed tension-shear specimen // *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2019. P. 1–14. DOI: 10.1111/ffe.13084.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Цветков Юрий Николаевич – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой технологии судоремонта, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова» (ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова), 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, д. 5/7; кафедра ТС; ГУМРФ; yuritsvet@mail.ru

Петров Василий Андреевич – аспирант кафедры технологии судоремонта, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова» (ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова), 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, д. 5/7; кафедра ТС; ГУМРФ; 9522114620w@gmail.com

Вихров Николай Михайлович — доктор технических наук, профессор, генеральный директор ЗАО «Канонерский судоремонтный завод», 198184, г. Санкт-Петербург, Канонерский остров, д. 41, e-mail: n.vihrov@inbox.ru

Yuriy N. Tsvetkov – doctor of engineering science, professor, head of ship repair subdepartment, Federal State-Financed Educational Institution of Higher Education «Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping» (Admiral Makarov SUMIS), 5/7, ul. Dvinskaya, Saint-Petersburg, 198035

Vasiliy A. Petrov – post-graduate student of ship repair subdepartment, Federal State-Financed Educational Institution of Higher Education «Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping» (Admiral Makarov SUMIS), d. 5/7, ul. Dvinskaya, Saint-Petersburg, 198035

Nikolay M. Vihrov — doctor of science, professor, general director of JSC "KSZ", 41, Kanonersky ostrov, St. Petersburg, 198184, Russia, e-mail: n.vihrov@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 21.05.2025; опубликована онлайн 20.09.2025.
Received 21.05.2025; published online 20.09.2025.

УДК 531.391.1:532.5.011
DOI: 10.37890/jwt.vi84.617

Исследование влияния несимметричных корпусов на гидродинамику речного катамарана грузоподъемностью 1000т.

Е.Ю. Чебан

ORCID: 0000-0002-0983-9879

М.Н. Москалева

ORCID: 0009-0006-5811-1821

А.И. Кожевников

ORCID: 0000-0001-9013-8510

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

Аннотация. В статье представлены результаты численного моделирования гидродинамики катамарана г/п=1000 т. с несимметричными корпусами. При моделировании использовались результаты исследований сопротивления катамаранов М.Я. Алферьева. Параметры численного моделирования, расчетная сетка устанавливались на основании верификации с результатами модельных экспериментов, показавшие хорошее совпадение. Моделировался катамаран в натурную величину для устранения масштабных эффектов в диапазоне чисел Фруда от 0,145 до 0,255. По результатам моделирования построены графики изменения коэффициентов сопротивления в зависимости от чисел Фруда и относительных клиренсов. Результаты исследования позволяют утверждать, что несимметрия корпуса в соотношении 0,35 к 0,65 с более узкой частью внутрь не оказывает существенного влияния на коэффициенты сопротивления в указанном диапазоне чисел Фруда по сравнению с симметричным корпусом. В то же время высоты волн в корме катамарана от несимметрии зависят существенно и оказываются ниже для несимметричного корпуса относительно симметричного.

Ключевые слова: внутренние водные пути, речной катамаран, трансформация корабельных волн, волновое сопротивление, несимметричные корпуса, численное моделирование

Study of the influence of asymmetrical hulls on the hydrodynamics of a river catamaran 1000 ton capacity

Egor Yu. Cheban

<https://orcid.org/0000-0002-0983-9879>

Maria N. Moskaleva

<https://orcid.org/0009-0006-5811-1821>

Artur I. Kozhevnikov

<https://orcid.org/0000-0001-9013-8510>

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article presents the results of numerical modeling hydrodynamics of the catamaran with a capacity of 1000 tons and asymmetric hulls. The results of the M.Ya. Alferyev resistance studies of a river catamarans were used in the modeling. The numerical simulation parameters and the computational mesh were set based on verification with the results of model experiments. Comparing showed good agreement with towing test data. A full-size catamaran was modeled to eliminate scale effects in the Froude number range from 0.145 to 0.255. Based on the simulation results, graphs of the change in drag coefficients

depending on the Froude numbers and relative catamaran's clearances were constructed. The results of the study allow us to state that the asymmetry of the hull in the ratio of 0.35 to 0.65 with a narrower part inward does not have a significant effect on the drag coefficients in the specified range of Froude numbers compared to a symmetrical hull. At the same time, the wave heights at the stern of the catamaran depend significantly on asymmetry and are lower for an asymmetrical hull than for a symmetrical one.

Keywords: inland waterways, river catamaran, wave formation of catamarans, wave resistance, nonsymmetrical hull, numerical modeling, resistance components.

Введение

Российская Федерация обладает сетью внутренних водных путей (ВВП) общей протяженностью около 101589.5 км, существенная часть которых расположена в регионах с достаточно ограниченной по времени навигацией, что требует повышения скорости транспортировки грузов и пассажиров по этим участкам ВВП. Значительную часть перевозимых грузов составляет колесная и гусеничная техника, а также контейнеры. В настоящее время для таких перевозок используются в том числе, суда проекта СК-2000, приспособленные для работы в качестве паромов (рис.1). Однако скорость движения таких судов не превышает 19 км/ч. Предполагается, что необходимая скорость движения судов может составлять 30 км/ч, что позволит не относить их к скоростным судам и обеспечить круглосуточную и всепогодную эксплуатацию. Техничко-экономическое обоснование необходимости повышения скорости судов приведено в работах [1,2]. С другой стороны, существенное повышение скорости однокорпусного водоизмещающего судна приводит к увеличению высоты генерируемых им корабельных волн, что показано во многих работах в том числе [3,4,5] Это может негативно сказываться на состоянии дна и берегов участков ВВП, в первую очередь мелководных. В таких условиях целесообразно использовать суда катамаранного типа, которые как показано в [6] имеют преимущество перед однокорпусными судами по высотам волн, т.е. «экологический резерв», что позволяет эксплуатировать судно с повышенными скоростями движения, но при тех же значениях высот волн.



Рис.1. Судно типа СК-2000 для перевозок накатных грузов



Рис. 2. Речные катамараны проектов 829 (КТ-619) и Р-19

Таблица 1

Характеристики речных катамаранов и судов типа СК-2000

		СК-2000	КТ-619 (пр. 829)	P-19
1.	Длина, м	72,95	76,2	97,05 м
2.	Ширина, м	14,9	15,0	15,64
3.	Высота борта, м	2,2	3,0	4,4
4.	Надводный габарит, м	13,94		
5.	Осадка, м	1,85	1,9 м	2,96
6.	Скорость, км/ч	19 / 14,7 (с приставкой)	24,5	27
7.	Дедвейт, т	985	-	-
8.	Грузоподъемность, т	900	600	1000
9.	Водоизмещение, т	1520	991	1761
10.	Мощность ГД, л.с.	2х600	2х540	2х900
11.	Экипаж, чел.	10	-	-

В 60-80 гг. прошлого века на ВВП эксплуатировались грузовые речные катамараны проектов Р-19 и 829 г/п 1000т. и 600т., однако скорости их движения не достигали 30 км/ч (рис. 2). Характеристики речных катамаранов и судов типа СК-2000 приведены в Таблице 1. Кроме того, как следует из результатов [7] катамаранные суда имеют преимущества перед другими в сопротивлении (рис. 3).

Повышение скорости даже катамаранного судна, как и любого другого плавающего тела, в любом случае приведет к увеличению высот корабельных волн и возрастанию волнового сопротивления, обусловленного в том числе и процессами трансформации волн между двумя корпусами. В работе [3] показано, что процессы трансформации волн в пространстве между корпусами катамарана крайне неустойчивы, и приводят к существенным изменениям в коэффициенте сопротивления катамарана при числах Фруда от 0,2 до 0,28. Например, при увеличении числа Фруда от 0,227 до 0,247 коэффициент только остаточного сопротивления увеличивается с $0,135 \cdot 10^3$ до $0,365 \cdot 10^3$, затем при повышении до $Fr=0,265$ уменьшается до $0,305 \cdot 10^3$ [3]. Такая зависимость сохраняется для разных клиренсов и форм корпусов, и по всей видимости обусловлена именно волновым сопротивлением. Такие колебания сопротивления могут оказывать существенное влияние на характеристики судна и должны быть по возможности сглажены. В связи с этим целесообразно рассмотреть вопрос управления трансформаций волн, например, с помощью изменения формы корпусов, в частности использования несимметричных корпусов.

Обычной практикой для судов катамаранного типа является использование корпусов с большими отношениями L/B и значительными относительными клиренсами, что позволяет избежать трансформации волн между корпусами. С другой стороны, использование таких корпусов снижает возможности при размещении помещений, систем, устройств, двигателей и т.д., что вызывает необходимость использования корпусов с большой полнотой.

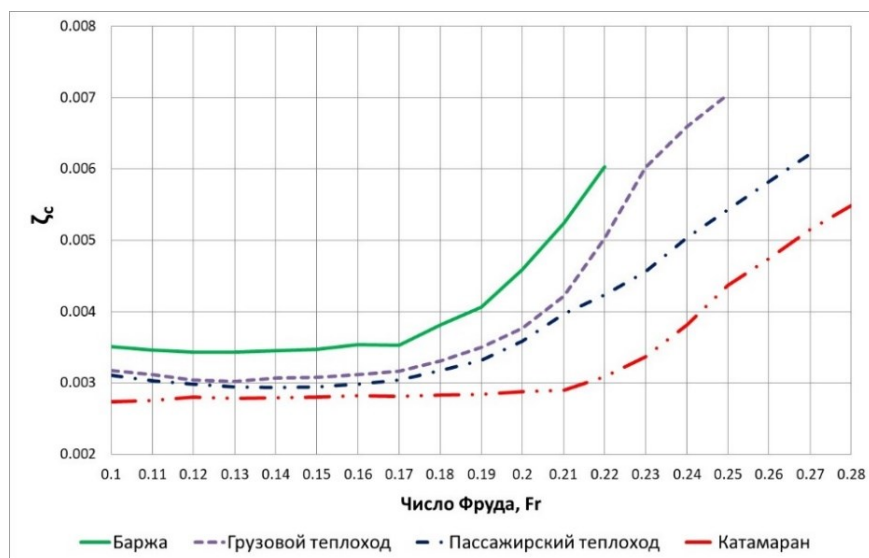


Рис. 3. Кривые относительного сопротивления судов различных типов

В отчете М.Я. Алферьева [6] приведены результаты модельных испытаний для разрезного катамарана, катамарана с полными обводами и катамарана с относительно острыми обводами (рис. 4), которые показали, что различия в сопротивлении для корпусов разной формы проявляются при $Fr=0,2$. Также показано, что корпус с плоским внутренним бортом не имеет преимуществ по сравнению с остальными. Этот же вывод подтверждается и работой [3] для большегрузных катамаранов с симметричным корпусом и плоским внутренним бортом для $L/B= 11,20, 12,44, 13,20, 14,67, 15,20, 16,89$.

Необходимо отметить, что участок кривых на графиках рис. 4 получен с большой дискретностью чисел Фруда в диапазоне от 0 до 0,3, в котором как было указано выше, происходит существенное изменение коэффициента сопротивления. Также, работы по исследованию сопротивления катамаранов посвящены в основном оценкам коэффициентов сопротивления в зависимости от формы корпусов, и по большей части не затрагивают причину их неустойчивости, которая вероятно связана с процессами трансформации волн в междукорпусном пространстве катамарана. С другой стороны, процессы трансформации зависят от геометрии твердых границ между которыми может происходить дифракция или интерференция волн.

Таким образом, целью настоящей работы является исследование гидродинамики речного катамарана с несимметричными корпусами, в первую очередь параметров волнообразования при его движении в доволновом режиме.

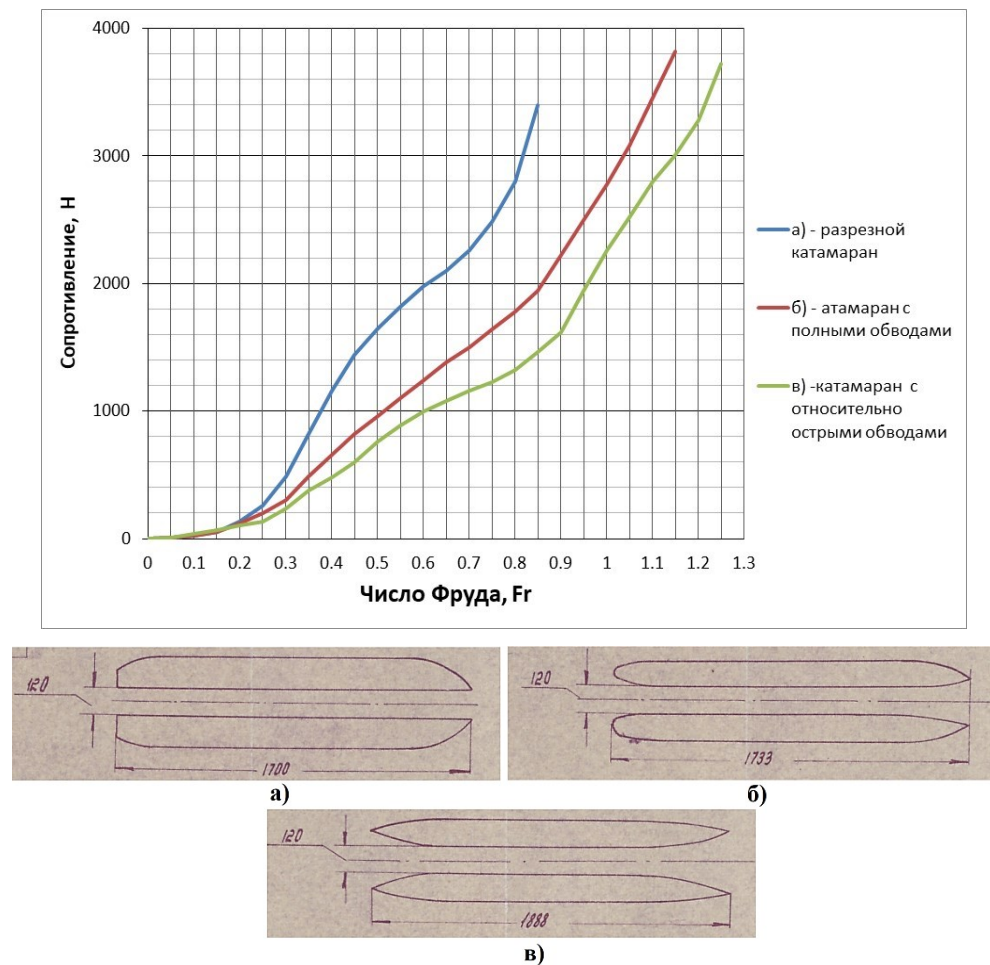


Рис. 4. Кривые буксировочного сопротивления для катамарана с разными формами корпусов по М.Я. Алферьеву [6]: а) разрезной корпус с плоским внутренним бортом; б) катамаран с относительно полными обводами; в) корпуса с острыми обводами

Численное моделирование гидродинамики речного катамарана с несимметричными корпусами.

Для численного моделирования гидродинамики несимметричного катамарана использовалась программа NUMECA/FineMarineTM, предназначенная для численного решения задач корабельной гидродинамики.

Выполненное ранее сравнительное моделирование [3] (рис. 5), показало хорошую сходимость с результатами модельных испытаний в опытовом бассейне, причем не только для коэффициентов сопротивления, но и для формы волновой поверхности (рис. 6), которая необходима для изучения процессов трансформации волн. Расхождения результатов численного моделирования и эксперимента могут быть объяснены тем, что для модели сопротивление трения рассчитывалось по экстраполятору трения, а в FineMarineTM моделировался гладкий корпус без учета шероховатости, что является предметом дальнейших исследований. Кроме того, при модельных испытаниях с использованием гравитационной системы модель изменяет свою посадку, что для катамарана может быть существенным [10], поскольку приводит к изменению формы волновой поверхности при движении катамарана. Также необходимо отметить зависимость сопротивления от расположения

турбулизатора при модельных испытаниях, а также моделей турбулентности, реализованных в численных расчетах, в большей степени приспособленных для моделирования натуральных объектов. В связи с этим в дальнейших исследованиях использовалась геометрия корпусов катамарана в натурную величину.

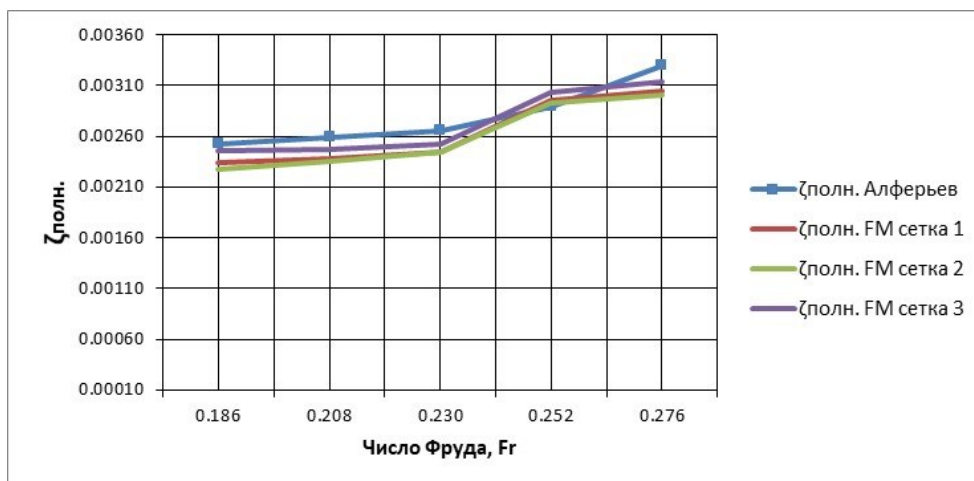


Рис. 5. Сравнение значений коэффициентов полного сопротивления катамарана KT-619 полученных с помощью NUMECA/FineMarine™, и буксировочных испытаний (сетка 1 – 2528123 ячеек; сетка 2 – 4742227 ячеек; сетка 3 – 5005850 ячеек)

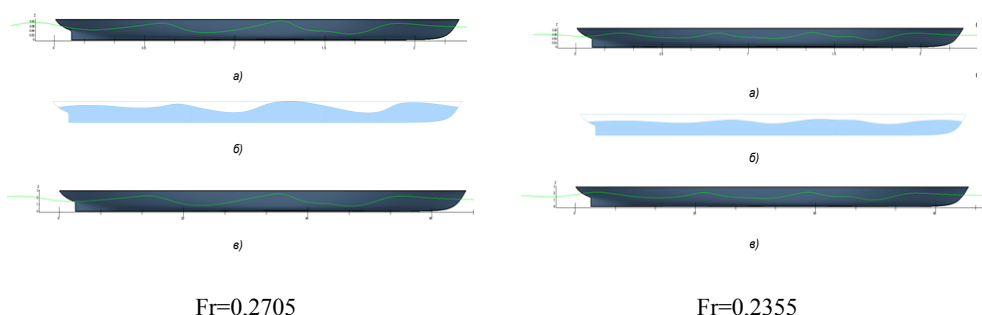


Рис. 6. Волновая поверхность в диаметральной плоскости катамарана: а) модель FM; б) модель в опытном бассейне; в) натуральный катамаран FM

Для численного моделирования использовалась геометрия несимметричных и симметричных корпусов катамарана с полными обводами. В соответствии с [7] соотношение бортов было установлено 0,35 и 0,65 от симметричного корпуса путем аффинного преобразования корпуса по ширине (рис. 7).

Размерения моделируемого катамарана составили: длина $L=95$ м., ширина $B=6,14$ м., высота борта $H=4,4$ м., осадка $T=2,9$ м., относительный клиренс $\bar{C} = C/2 \cdot B = 0,3; 0,35; 0,4; 0,44; 0,5; 0,56$ при грузоподъемности 1000 т, где C - горизонтальный клиренс катамарана, B – ширина одного корпуса.

Параметры расчетной области, начальные и граничные условия, расчетная сетка использовались в соответствии с [3,4].

В частности, расчетная сетка строилась на основании оценки сеточной сходимости. Использовалась сетка средней плотности с дополнительным измельчением в области изменения волновой поверхности [3,4] в виде сектора, охватывающая в том числе междукорпусное пространство. Количество ячеек с учетом

локальной адаптации составило 5,5 – 6 млн. в зависимости от клиренса катамарана. Во всех случаях применялась «k- ω -модель» турбулентности, показавшая хорошие результаты при решении задач корабельной гидродинамики [3,9].

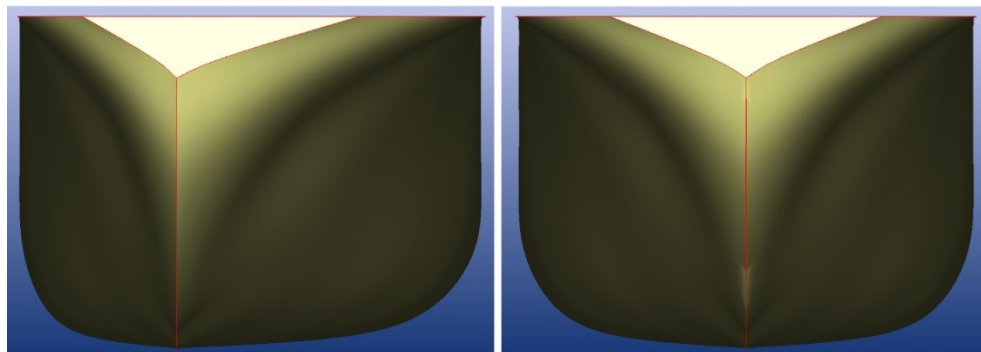


Рис. 7. Геометрия симметричного и несимметричного корпусов катамарана

Результаты и обсуждение

Зависимости коэффициента полного сопротивления от чисел Фруда, а также относительных клиренсов $\bar{C}$, полученные в ходе моделирования, приведены на (рис.8) и (рис.9). Как видно из представленных графиков, существенной разницы в коэффициентах сопротивления между симметричным и несимметричным корпусами нет, что в принципе соответствует результатам М.Я. Алферьева, полученным в ходе модельных испытаний (рис. 4).

Существенная зависимость коэффициента сопротивления от относительного клиренса начинает проявляться при $Fr > 0,2$, что подтверждается результатами ранее выполненных исследований волнообразования большегрузного катамарана с симметричным корпусом и корпусом с плоским внутренним бортом [3,4]. По всей видимости процессы трансформации волн, и, следовательно, величина волнового сопротивления, существенно зависят от длины корпуса, т.е. междукорпусное пространство катамарана является своего рода волноводом, в котором происходят процессы дифракции и интерференции волн. Это позволяет выделить кроме доволновой и волновой областей, переходную область, в которой происходит изменение сопротивления катамарана с большой амплитудой. Подобная область может быть существенна именно для большегрузных речных катамаранов при движении в диапазоне чисел Фруда от 0,25 до 0,3.

Интересно изменение площади смоченной поверхности катамарана. Очевидная зависимость увеличения площади смоченной поверхности при повышении скорости, нарушается для несимметричного корпуса (рис. 10а), когда при $Fr > 0,237$ площадь смоченной поверхности для всех клиренсов стабилизируется, что может свидетельствовать о примерно постоянной картине трансформации волн в данном узком диапазоне чисел Фруда. В то же время, зависимость площади смоченной поверхности от клиренса практически несущественна (рис. 10), поскольку кривые практически совпадают для всех значений $\bar{C}$.

Об изменении картины трансформации корабельных волн, генерируемых катамараном, можно судить по результатам измерения высот, которые обобщены на графиках рис. 11-13. На рис. 11 и 12 показаны высоты волн в носовой части корпусов катамарана (int – внутренний борт, out – наружный борт). Высоты волн в носовой части катамарана с симметричными корпусами по внутреннему и наружному бортам отличаются мало, но в то же время максимальная высота носовой волны наблюдается при относительном клиренсе $\bar{C} = 0,56$. Однако, для $\bar{C} = 0,5$ высота волны меньше на 17 процентов при $Fr = 0.237$.

Разброс высот волн при изменении клиренса для симметричного корпуса (рис. 11б) начинается при $Fr=0,2$, что согласуется с изменениями коэффициента полного сопротивления, и по всей видимости волновой составляющей сопротивления.

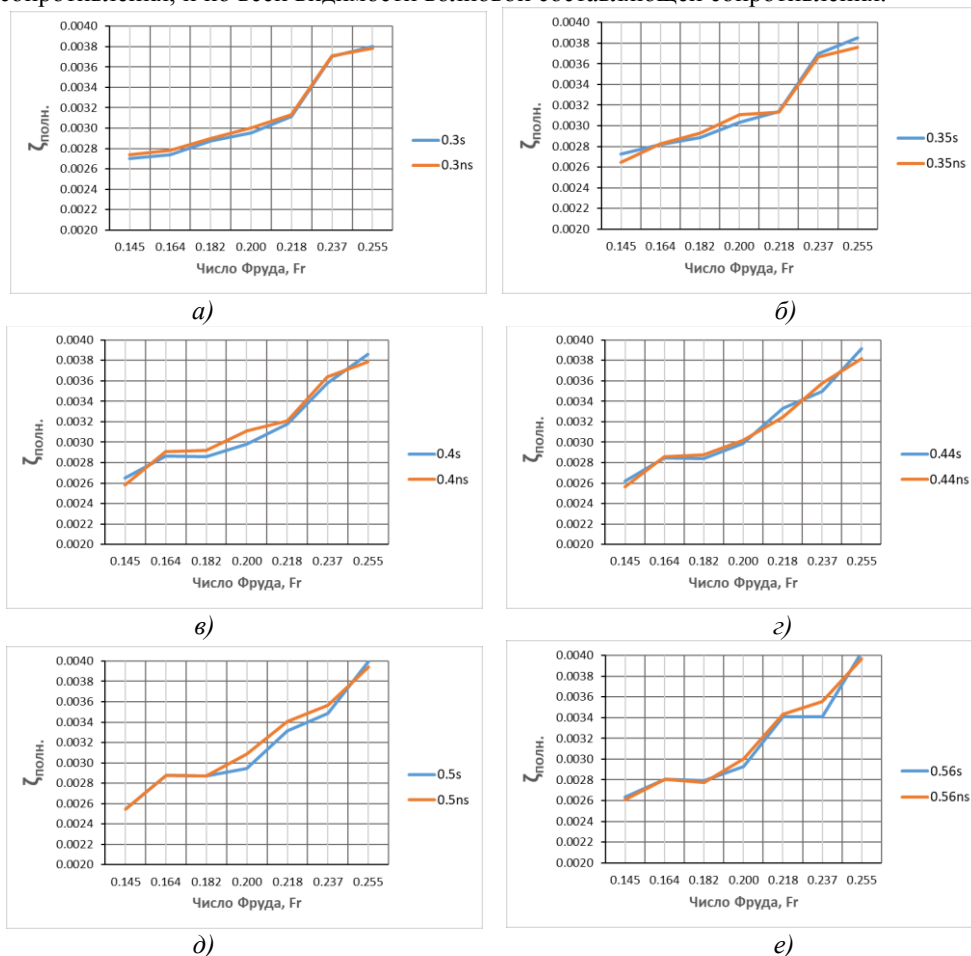


Рис. 8. Зависимость коэффициентов полного сопротивления от числа Фруда:
а) $\bar{C} = 0,3$; б) $\bar{C} = 0,35$; $\bar{C} = 0,4$; $\bar{C} = 0,44$; $\bar{C} = 0,5$; $\bar{C} = 0,56$

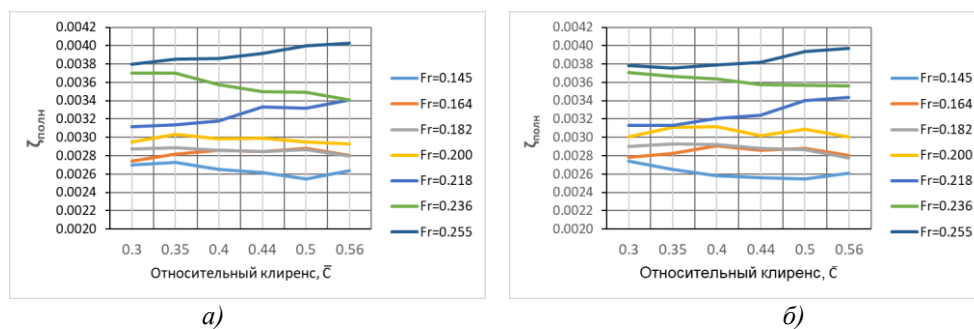


Рис. 9. Зависимость коэффициентов полного сопротивления от относительного клиренса:
а) несимметричный корпус; б) симметричный корпус

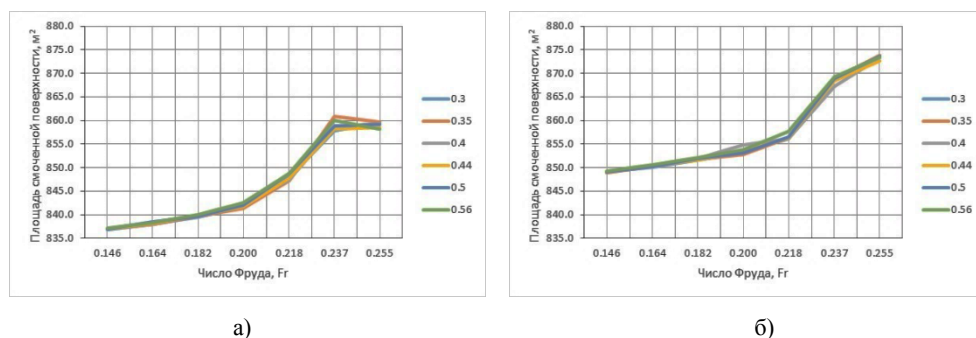


Рис. 10. Площадь смоченной поверхности катамарана (один корпус): а) несимметричный корпус; б) симметричный корпус

Для несимметричного корпуса наблюдается больший разброс высот волн, который становится существенным при $Fr=0,218$: высоты носовых волн для внутреннего борта оказываются ниже, что обусловлено меньшей полнотой обводов. Наблюдаются локальные максимумы при $Fr=0,2$ для $\bar{C} = 0,4$.

Волновая поверхность в кормовой части катамарана формируется в том числе в результате трансформации волн в междукорпусном пространстве. В результате, минимальные высоты волн для несимметричного корпуса наблюдаются для относительного клиренса $\bar{C} = 0,35$, но для симметричного корпуса при этом же клиренсе наблюдаются наибольшие высоты волн ($Fr=0,237$), но при $\bar{C} = 0,3$ наблюдаются наибольшие высоты волн также при $Fr=0,237$ (рис. 12). Для симметричного корпуса высоты волн по внутреннему борту в кормовой части в общем случае оказываются выше. В то же время, появление локальных максимумов и их смещение по числам Фруда позволяет предположить, что в этих случаях происходит интерференция волн, приводящая в том числе к разнице в сопротивлении.

При повышении скорости для постоянной длины корпусов катамарана число волн между корпусами сокращается, но их высота увеличивается (рис. 13), что приводит к увеличению высот и длин волн и понижению их крутизны. Все эти явления могут привести, в том числе, к перераспределению нагрузок на конструкции корпуса и моста катамарана, которые необходимо учитывать при проектировании судна.

О характере возникновения и трансформации волн можно судить в том числе по картинкам, показывающим форму свободной поверхности при движении катамарана (рис. 14).

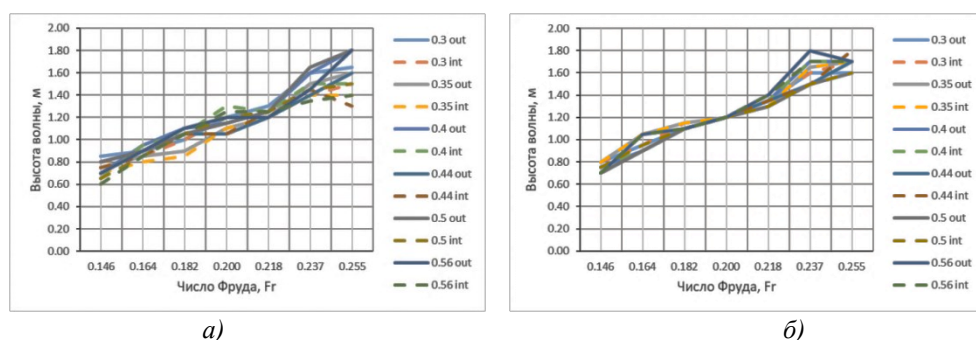


Рис. 11. Высоты волн в носу корпусов катамарана: а) несимметричный корпус; б) симметричный корпус

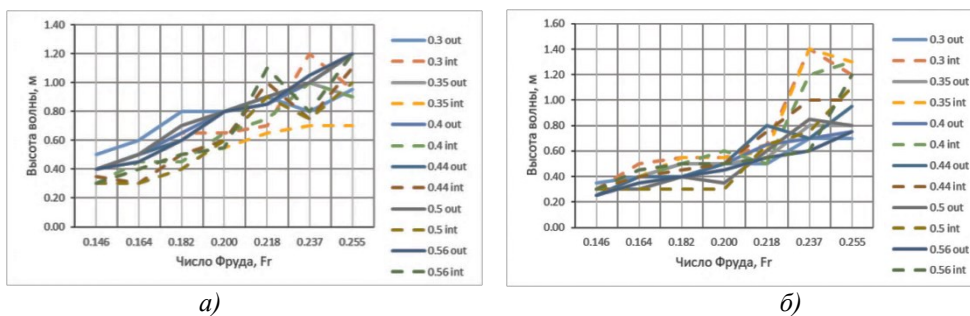


Рис. 12. Высоты волн за кормой корпусов катамарана:
а) несимметричный корпус; б) симметричный корпус

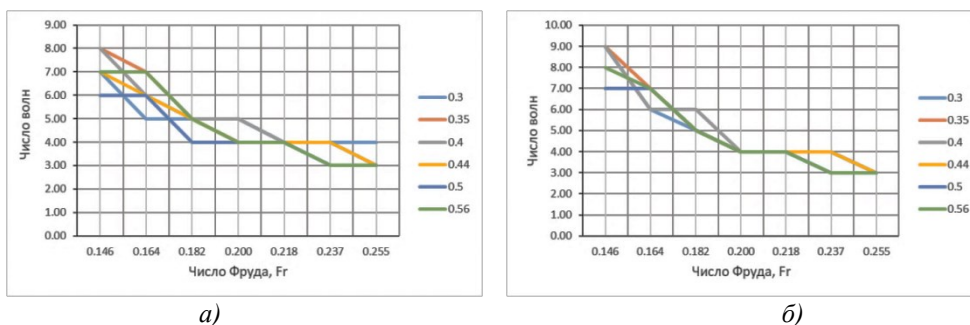


Рис. 13. Число волн в междукорпусном пространстве катамарана:
а) несимметричный корпус; б) симметричный корпус

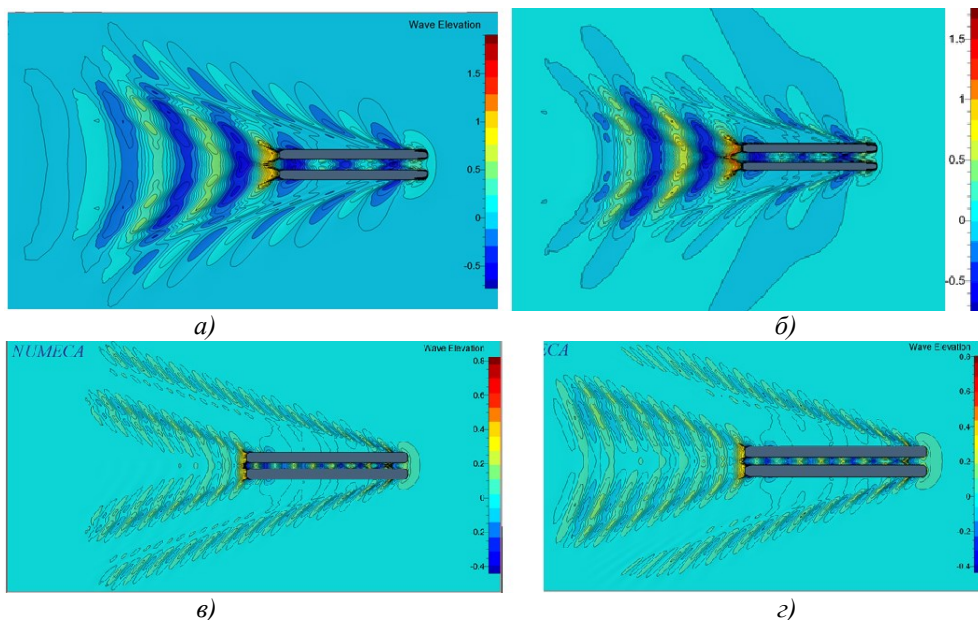


Рис. 14. Волновая поверхность при движении катамарана: а) несимметричный, 7,78 м/с ($Fr=0,255$, $\bar{C} = 0,56$); б) симметричный 7,78 м/с ($Fr=0,255$, $\bar{C} = 0,56$); в) несимметричный, 4,44 м/с ($Fr=0,145$; $\bar{C} = 0,3$); г) симметричный 4,44 м/с ($Fr=0,145$; $\bar{C} = 0,3$)

Заключение

В настоящей работе приведены результаты исследования гидродинамики речного катамарана длиной $L=95$ м с несимметричными корпусами численными методами. Показано, что несимметрия корпусов не оказывает существенного влияния на полное сопротивление катамарана в диапазоне числе Фруда 0,145-0,255. В то же время при $Fr=0,218$, $Fr=0,237$ высоты волн в междукорпусном пространстве имеют меньшую высоту в кормовой части, по сравнению с симметричным корпусом, что может быть важным для снижения волнового воздействия на берега и ложе участков внутренних водных путей. Кроме того, высоты волн в междукорпусном пространстве зависят от относительного клиренса катамарана.

Благодарности

Авторы статьи благодарят д.т.н., профессора кафедры Прикладной математики и математического моделирования ФГБОУ ВО «СПбГМТУ» Д.В. Никущенко за помощь при выполнении исследований.

Список литературы

1. Костров В.Н., Телегин А.И., Митрошин С.Г. Моделирование и продвижение новых технологий в паромно-транспортной логистической системе. Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2008. № 24. С. 132-136.
2. Лукина Е.А., Митрошин С.Г., Битков Д.А. «Обоснование применения накатного судна для паромно-транспортных грузовых перевозок в Волжско-Камском бассейне». / Вестник ВГАВТ. Вып.28.- Н.Новгород: Изд-во ФГОУ ВПО ВГАВТ, 2009. – С.56-62.
3. Исследование волнообразования большегрузного катамарана для внутренних водных путей численными методами / Е. Ю. Чебан, Е. А. Лукина, С. Г. Митрошин [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. – 2023. – № 3-1(61). – С. 210-219. – DOI 10.37220/MIT.2023.61.3.021. – EDN PERDQG.
4. Оценка волнообразования большегрузного катамарана с различными формами внутреннего борта / Е. Ю. Чебан, О. В. Мартемьянова, С. Г. Митрошин [и др.] // Научные проблемы водного транспорта. – 2020. – № 63. – С. 109-120. – DOI 10.37890/jwt.vi63.82. – EDN AXBAQK.
5. Результаты сравнения параметров корабельных волн от судов различных типов с помощью модельных испытаний / В. Л. Этин, Е. А. Лукина, С. Г. Митрошин, Е. М. Сироткин // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2015. – № 45. – С. 192-196. – EDN VHWADL.
6. Оценка волнообразования большегрузного катамарана для внутренних водных путей / И.К. Кузьмичев, Е.А. Лукина, С.Г. Митрошин, Е.Ю. Чебан // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – № 4-3(38). – С. 99-105. – EDN YPLAKC.
7. Горьковский институт инженеров водного транспорта, Кафедра теории корабля №ТБ-25. Отчет по теме №17 «Изыскание новых типов судов для скоростных перевозок», г. Горький, 1958 г.
8. Yusuke Tahara, Daniele Peri, Emilio Fortunato Campana, Frederick Stern. Single- and multiobjective design optimization of a fast multihull ship: numerical and experimental results. December 2011 Journal of Marine Science and Technology 16(4):412-433 DOI:10.1007/s00773-011-0137-y
9. Численные методы в механике жидкости: учебное пособие / Д.В. Никущенко. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГМТУ, 2025. – 144 с. ISBN 978-5-88303-720-6
10. Корякова, М. Н. Оценка изменения посадки большегрузного катамарана численными методами / М. Н. Корякова, С. В. Бушков, Е. Ю. Чебан // Транспорт. Горизонты развития : Труды 4-го Международного научно-промышленного форума, Нижний Новгород-Новосибирск-Владивосток-Самара, 23–26 апреля 2024 года. – Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2024. – С. 117. – EDN ADDWCN.
11. Алферьев М.Я., Мадорский Г.С. Транспортные катамараны внутреннего плавания. М., изд. «Транспорт», 1975, 336 с.

12. Многокорпусные суда. Под ред. Дубровского В.А. Л., изд. «Судостроение», 1978, 304с.

References

1. Kostrov V.N., Telegin A.I., Mitroshin S.G. Modelirovanie i prodvizhenie novyh tehnologij v paromno-transportnoj logisticheskoy sisteme. Vestnik Volzhskoj gosudarstvennoj akademii vodnogo transporta. 2008. № 24. S. 132-136.
2. Lukina E.A., Mitroshin S.G., Bitkov D.A. «Obosnovanie primeneniya nakatnogo sudna dlja paromno-transportnyh gruzovyh perevozok v Volzhsko-Kamskom bassejne». / Vestnik VGAVT. Vyp.28.- N.Novgorod: Izd-vo FGOU VPO VGAVT, 2009. – S.56-62.
3. Cheban E.Yu., Lukina E.A., Mitroshin S.G., Nikushchenko D.V., Martemyanova O.V. Investigation of wave formation of a heavy-duty catamaran for inland waterways by numerical methods. //Marine intelligent technologies. 2023. No. 3-1 (61). pp. 210-219.
4. Estimation of the wave formation for extra-capacity catamaran with various forms of inner sides / E. Ju. Cheban, O. V. Martem'janova, S. G. Mitroshin [i dr.] // Nauchnye problemy vodnogo transporta. – 2020. – № 63. – S. 109-120. – DOI 10.37890/jwt.vi63.82. – EDN AXBAQK.
5. Rezul'taty sravneniya parametrov korabel'nyh voln ot sudov razlichnyh tipov s pomoshh'ju model'nyh ispytaniy / V. L. Jetin, E. A. Lukina, S. G. Mitroshin, E. M. Sirotkin // Vestnik Volzhskoj gosudarstvennoj akademii vodnogo transporta. – 2015. – № 45. – S. 192-196. – EDN VHWADL.
6. Kuzmichev I.K., Mitroshin S.G., Cheban E.Yu., Lukina E.A. Assessment of wave formation of a heavy-duty catamaran for inland waterways // Marine intelligent technologies. Scientific Journal No. 4 (38) T.3, 2017. – pp. 99-106. [Electronic resource: www.morintex.ru , ISSN No. 2073-7173].
7. Gor'kovskij institut inzhenerov vodnogo transporta, Kafedra teorii korablja №TB-25. Otchet po teme №17 «Izyskanie novyh tipov sudov dlja skorostnyh perevozok», g. Gor'kij, 1958 g.
8. Yusuke Tahara, Daniele Peri, Emilio Fortunato Campana, Frederick Stern. Single- and multiobjective design optimization of a fast multihull ship: numerical and experimental results. December 2011 Journal of Marine Science and Technology 16(4):412-433 DOI:10.1007/s00773-011-0137-y
9. Chislennye metody v mehanike zhidkosti: uchebnoe posobie / D.V. Nikushhenko. – Sankt-Peterburg: Izd-vo SPbGMTU, 2025. – 144 s. ISBN 978-5-88303-720-6
10. Korjakova, M. N. Estimation the change of the large cargo catamaran's draft and trim by numerical methods / M. N. Korjakova, S. V. Bushkov, E. Ju. Cheban // Transport. Gorizonty razvitiya : Trudy 4-go Mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma, Nizhnij Novgorod-Novosibirsk-Vladivostok-Samara, 23–26 aprelja 2024 goda. – Nizhnij Novgorod: Volzhskij gosudarstvennyj universitet vodnogo transporta, 2024. – S. 117. – EDN ADDWCN.
11. Alferyev M.Ya., Madorsky G.S. Transportnye katamarany vnutrennego plavaniya [Transport catamarans of inland navigation]. M., izd. "Transport", 1975, 336 s.
12. Mnogokorpusnye suda [Multi-hull vessels]. Pod red. Dubrovsky V.A. L., izd. "Shipbuilding", 1978, 304 s.

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

Москалева Мария Николаевна, аспирант кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности судов, Волжский

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

Maria N. Moskaleva, postgraduate student Hydrodynamics, ship theory and ship's ecological safety department, Volga State

государственный университет водного
транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г.
Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail:
kshtaltnaja@rambler.ru

Кожевников Артур Игоревич, аспирант
кафедры гидродинамики, теории корабля и
экологической безопасности судов, Волжский
государственный университет водного
транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г.
Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail:
nkolonget@ro.ru

University of Water Transport 603950, Nizhniy
Novgorod, Nesterova, 5, e-mail:
kshtaltnaja@rambler.ru

Artur I. Kozhevnikov, postgraduate student
Hydrodynamics, ship theory and ship's
ecological safety department, Volga State
University of Water Transport 603950, Nizhniy
Novgorod, Nesterova, 5, e-mail:
nkolonget@ro.ru

Статья поступила в редакцию 26.05.2025; опубликована онлайн 20.09.2025.
Received 26.05.2025; published online 20.09.2025.

СУДОВОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

SHIP POWER EQUIPMENT

УДК: 621.317.629.12

DOI: 10.37890/jwt.vi84.637

Анализ переходных процессов судовых дизель-генераторных установок

В.И. Брежнев¹

В.А. Жуков²

ORCID: 0000-0002-4045-4504

¹«Транснефть-Балтика», г. Санкт-Петербург, Россия

²Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Статья посвящена описанию результатов исследования переходных процессов дизель-генераторной установки в процессе пуска. Проведен анализ изменения активной мощности, крутящего момента и частоты вращения коленчатого вала с момента запуска до выхода на установившийся режим работы. Для регистрации параметров переходного процесса использовалась SCADA-система, обеспечившая получение достоверных данных в режиме реального времени. Полученные результаты показали, что переходные процессы по исследованным параметрам имеют различную продолжительность. Наиболее длительным является переходный процесс по частоте вращения коленчатого вала. Графики, полученные в процессе исследований, представляют информацию, необходимую для оценки качества переходных процессов. Проведенные исследования способствует выявлению возможностей для повышения эффективности системы управления дизель-генераторными установками в процессе пуска и перехода на установившийся режим.

Ключевые слова: дизель-генераторные установки, переходные процессы, активная мощность, флуктуации мощности, пусковая неустойчивость, частота вращения вала, SCADA-система, устойчивость системы, серверно-сетевое управление

Analysis of transient processes of marine diesel generator sets

Vladislav I. Brezhnev¹

Vladimir A. Zhukov²

ORCID: 0000-0002-4045-4504

¹Transneft-Baltika, St. Petersburg, Russia

²Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia

Abstract. The article describes the results of a study of transient processes of a diesel generator set during start-up. The analysis of changes in the active power, torque and speed of rotation of the crankshaft from the moment of start-up to reaching steady-state operation is carried out. To register the parameters of the transient process, a SCADA system was used, which provided reliable data in real time. The results showed that the transients in the studied parameters have different durations. The longest is the transient process in terms of crankshaft speed. The graphs obtained in the course of the research provide the information necessary to assess the quality of the transients. The conducted research helps to identify opportunities for improving the efficiency of the control system of diesel generator sets during start-up and transition to steady-state operation.

Keywords: diesel generator sets, transients, active power, power fluctuations, starting instability, shaft speed, SCADA system, system stability, server and network management

Введение

Одной из современных тенденций развития судовой энергетики является повышение роли дизель-генераторных установок, которые в настоящее время используются не только для обеспечения судовых потребителей электроэнергией, но и для выработки энергии, потребляемой движителями, в качестве которых достаточно часто используются винторулевые колонки [1]. Сложные условия работы винторулевых колонок и резкопеременные нагрузки дизель-генераторов приводят к появлению переходных процессов, качество которых оказывают значительное влияние на эффективность и надежность судовой энергетической установки. Вопросам влияния изменений нагрузки на работу дизель-генераторных установок посвящены работы [2-4]. Одним из важнейших требований, предъявляемых к дизель-генераторам является его способность адаптироваться к различным нагрузочным режимам и преодолевать пусковые неустойчивости. Проведенный анализ переходных процессов дизель-генераторных установок позволил выявить их характерные особенности, оценить эффективность системы управления установкой и наметить направления ее совершенствования.

Методы и материалы

Объектом исследований являлась энергетическая установка, в состав которой входят две винторулевые колонки (ВРК) и четыре дизель-генератора (рис. 1).

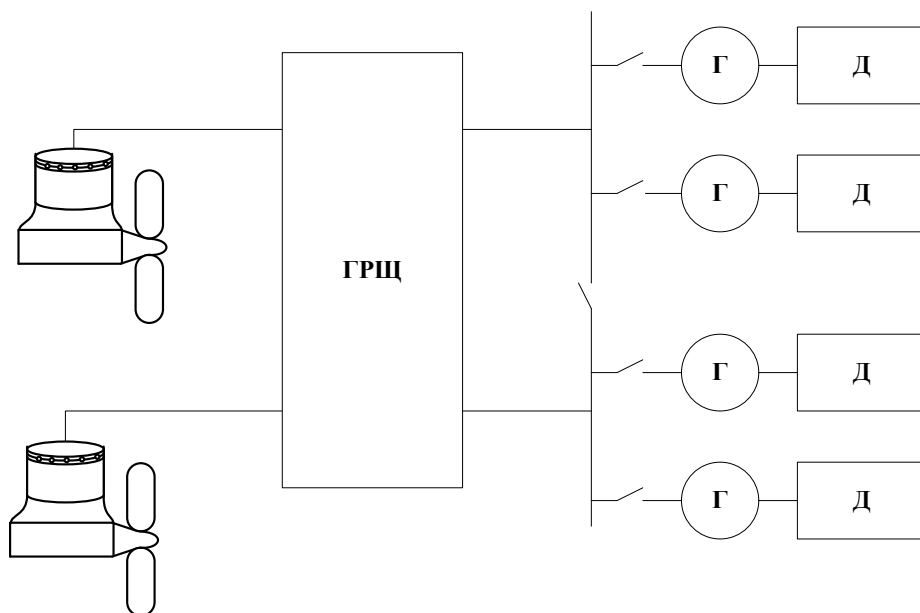


Рис. 1. Схема судовой энергетической установки с четырьмя дизель-генераторами

В представленной энергетической установке предусматривается параллельная работа дизель-генераторов. Особенности параллельной работы дизель-генераторов рассмотрены в работах [5-7]. Представленные в работах материалы свидетельствуют о необходимости совершенствования систем управления дизель-генераторами, работающими параллельно. Реализация различных способов регулирования работы дизель-генераторных установок рассмотрены в работах [8-10]. Наиболее

перспективными являются системы управления дизель-генераторами, созданные на основе нейронных сетей и искусственного интеллекта [11,12].

Основным критерием совершенства систем управления дизель-генераторных установок является качество переходных процессов, характеризующее их длительностью и величиной заброса регулируемого параметра. Именно поэтому для оценки эффективности систем управления необходимо анализировать переходные процессы, сопровождающие изменение нагрузки на дизель-генераторную установку.

В процессе стендовых испытаний дизель-генераторных установок были получены данные об изменении в процессе запуска и перехода на установившийся режим работы таких параметров как активная мощность, крутящий момент на выходном валу дизельного двигателя и частота вращения вала дизель-генератора.

Важнейшим параметром электрического тока, подаваемого потребителю, является частота, которая, в свою очередь, непосредственно зависит от частоты вращения вала первичного двигателя. В процессе испытаний частота вращения определялась при помощи датчика положения коленчатого вала, который считывал импульсы частоты вращения с маховика. Мощность, вырабатываемая двигателем определяется частотой вращения и крутящим моментом. Крутящий момент на валу двигателя определялся при помощи датчика, установленного на муфте между дизельным двигателем и генератором.

При работе на газотопливном и дизельном режимах измерялся расход топлива, с использованием расходомеров, установленных в каждом контуре подачи топлива.

Информация, получаемая от датчиков в процессе испытаний, передавалась в блок управления для последующей обработки.

Для комплексного мониторинга и записи всех рабочих параметров была применена SCADA-система (Supervisory Control and Data Acquisition), интегрированная с электронным блоком управления. Данная система обеспечивала:

- автоматизированный сбор данных с датчиков (ваттметры, вольтметры, тахометры, ДКМ, расходомеры);
- визуализацию параметров в реальном времени;
- централизованную обработку и регистрацию данных в архиве;
- синхронную временную привязку показаний для построения графиков;
- экспорт результатов в цифровом виде для дальнейшего анализа и построения графиков в программной среде.

Графики, представленные на рисунках 2–4, были получены на основе реальных измерений, зафиксированных с помощью SCADA-системы. Это позволило достичь высокой точности временной и параметрической корреляции данных, что является критически важным при анализе переходных процессов в энергетических установках.

Колебания активной мощности (той части электрической мощности, которая преобразуется в полезную работу) получены на основе реальных измерений и представлены на рисунке 2.

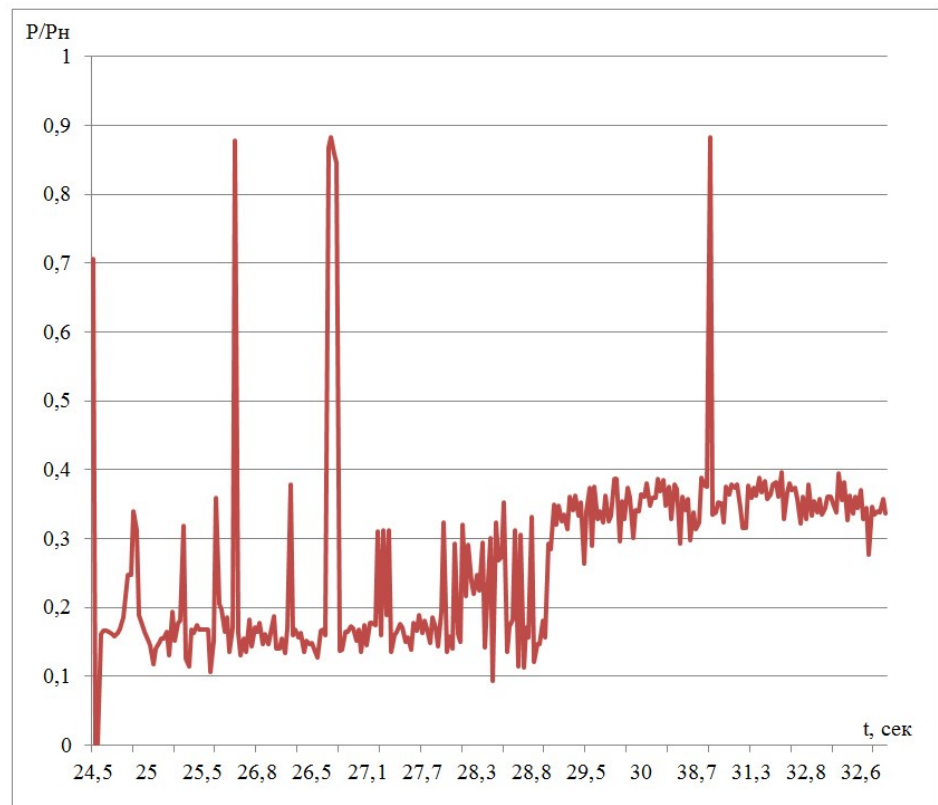


Рис. 2. Колебания активной мощности ВРК в период пуска: P/P_n — относительная мощность

Начальный резкий скачок мощности около 24,6 сек — момент включения установки, сопровождающийся значительным увеличением мощности.

Частые флуктуации между 24,6 и 29 секундами — период пусковых нестабильностей и адаптации оборудования, характерный для начального этапа работы.

Выраженные пики мощности в интервалах 25,6, 26,0, 26,5 и 30,6 секунд — кратковременные, но значительные увеличения мощности, вызванные изменениями нагрузки.

Стабилизация сигнала после 29 секунды — мощность стабилизируется в пределах 32-35 % от номинальной, что свидетельствует о переходе системы в устойчивый рабочий режим.

Последний скачок активной мощности на 31-ой секунде — является завершающим переходным моментом предшествующим полной стабилизацией режима работы дизель-генераторной установки.

На графике чётко виден начальный скачок мощности, который происходит примерно через 24 секунды после старта генератора. Этот момент соответствует преодолению инерционных сил после запуска установки.

В течение последующего периода времени наблюдаются интенсивные колебания мощности, которые характеризуют период нестабильности. Колебания мощности представляют собой реакцию установки на изменение нагрузочного режима и ее адаптацию к увеличившейся нагрузке. Скачки мощности, приходящиеся на 25,6, 26,0, 26,5 и 30,6 секунд являются отражением изменения подачи топлива, как реакции первичного двигателя на увеличение нагрузки. Амплитуда скачков мощности и их

частота важны для анализа реакции системы управления дизель-генераторной установки на изменение нагрузочных режимов.

После 29 секунды график демонстрирует стабилизацию мощности, которая устанавливается на уровне 32-35 % от номинальной мощности генератора. Этот процесс свидетельствует о завершении этапа пусковых нестабильностей и успешном переходе системы в устойчивый рабочий режим. Статус стабилизации означает, что дизель-генератор может поддерживать необходимые параметры работы и адаптироваться к нормальным эксплуатационным условиям.

Последний выброс мощности, зафиксированный на 30,6 секунде, представляет собой заключительный переходный процесс перед окончательной стабилизацией работы установки. Этот пик может быть вызван внутренними корректировками работы системы или кратковременным изменением внешней нагрузки, после чего система приходит к установившемуся режиму работы.

На рисунке 3 представлен переходный процесс по крутящему моменту. Полученные результаты свидетельствуют, что переход на новый установившийся режим осуществляется с двумя пиковыми забросами крутящего момента, первый из которых наблюдается с 26 по 29 секунду переходного процесса, второй, более продолжительный – с 31 по 36 секунду. Переходный процесс по крутящему моменту более длительный по сравнению с переходным процессом по активной мощности и продолжается 39 с. Большую инерционность изменения крутящего момента необходимо учитывать при модернизации систем управления дизель-генераторными установками.

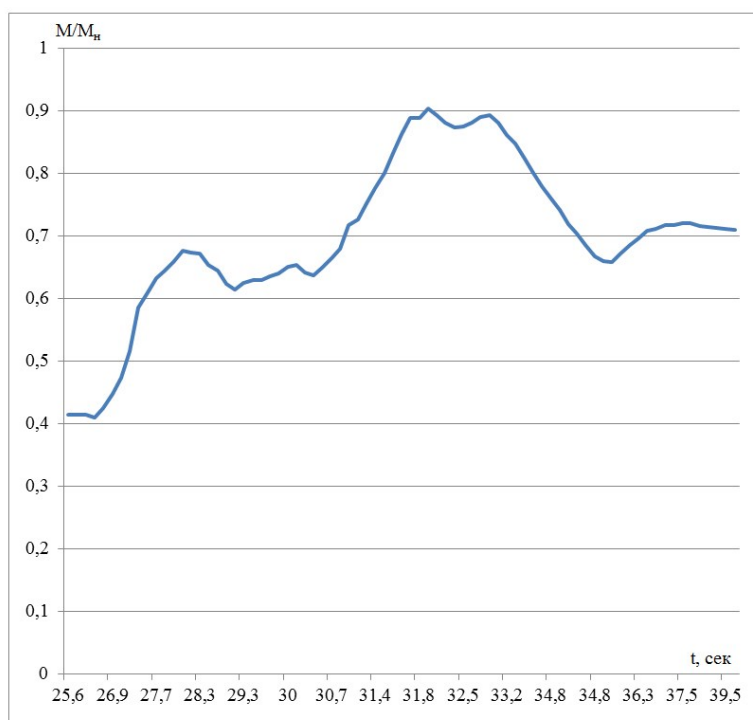


Рис. 3. Переходный процесс по крутящему моменту на валу дизельного двигателя: M/M_n — относительный крутящий момент

Рисунок 4 иллюстрирует изменение частоты вращения вала дизель-генератора при переходных режимах работы установки. График отображает реакцию системы на изменения внешней нагрузки и корректировку работы регулятора, предоставляя

важную информацию о стабильности и адаптивности двигателя в процессе его эксплуатации.

На начальном участке графика (первые 28 секунд) частота вращения вала стабильно находится на уровне около 500 мин⁻¹, что соответствует номинальному значению работы дизель-генератора. Этот участок можно трактовать как фазу установления режима работы, когда система достигает исходного стабильного состояния.

В промежутке времени с 28 по 50 секунду наблюдаются небольшие колебания частоты вращения в диапазоне от 490 до 505 мин⁻¹. Это является нормальным явлением, отражающим адаптационные процессы системы, регулирующей работу двигателя. Периодические понижения частоты вращения (в окрестности 29 и 47 секунд) и последующие её восстановления демонстрируют реакции на мелкие изменения нагрузки и настройки работы регулятора.

В районе 55-57 секунд график показывает резкий скачок частоты вращения до 530 мин⁻¹, что указывает на существенное изменение режима работы двигателя. Это может быть связано с кратковременной разгрузкой системы или переходом на новый рабочий режим, требующий повышенных оборотов для обеспечения необходимой мощности.

После резкого увеличения частоты вращения, на 57-63 секундах наблюдается её плавное снижение до уровня около 500 мин⁻¹, что подтверждает достижение нового устойчивого режима работы двигателя. Устойчивость системы управления оборотами в данном участке графика говорит о корректной настройке и адаптации к изменениям внешней нагрузки.

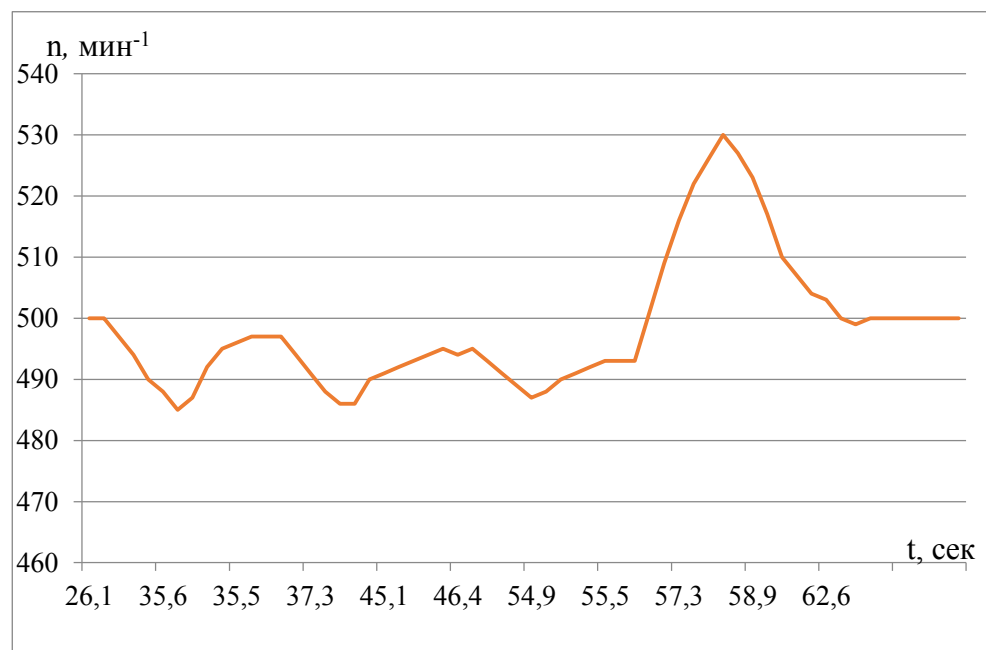


Рис. 4. Изменения частоты вращения вала на переходном режиме

Результаты

В ходе анализа переходных процессов были получены следующие результаты.

На начальном этапе работы установки (примерно через 25 секунд после пуска) был зафиксирован резкий скачок мощности, что соответствует включению дизель-генератора. Период с 24,6 до 29 секунд характеризуется частыми флуктуациями мощности, что связано с пусковыми нестабильностями и адаптацией оборудования.

Пиковые значения мощности в 25,6, 26,0, 26,5 и 30,6 секундах указывают на кратковременные изменения нагрузки, вызванные переходными процессами в системе. Стабилизация мощности происходит после 29 секунды на уровне 32-35 % от номинальной мощности, что свидетельствует о переходе системы в устойчивый рабочий режим.

Крутящий момент стабилизируется через 39 секунд, пройдя через два пиковых подъема, которые продолжаются от 3 до 5 секунд.

Частота вращения вала дизель-генератора: На начальном этапе (первые 28 секунд) частота вращения вала стабилизировалась на уровне около 500 мин-1. В интервале с 28 до 50 секунд наблюдаются небольшие колебания частоты вращения, что отражает нормальные адаптационные процессы системы. На 55-57 секундах был зафиксирован резкий скачок частоты вращения до 530 мин-1, что указывает на значительное изменение режима работы двигателя. После 57 секунд частота вращения постепенно снизилась до уровня около 500 мин-1, что подтверждает достижение нового устойчивого режима работы.

Обсуждение

Проведенные исследования переходных процессов дизель-генераторных установок позволили установить закономерности изменения их важнейших эксплуатационных характеристик, таких как активная мощность, крутящий момент и частота вращения.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют, что изменения всех указанных параметров при изменении нагрузочного режима дизель-генератора носят колебательный характер с пиковыми значениями исследованных характеристик.

Колебания параметров, характеризующих работу дизель-генератора, соответствуют промежутку времени, необходимому для адаптации установки к новому нагрузочному режиму. Результатом аperiodических изменений параметров является их стабилизация, свидетельствующая о переходе дизель-генератора на установившийся режим работы.

Частота колебаний исследованных параметров и амплитуды их значений определяются инерционностью дизель-генераторной установки и эффективностью работы системы управления, обеспечивающей изменение подачи топлива к первичному дизельному двигателю при изменении нагрузки на генератор.

Переходные процессы для исследованных параметров имеют различную продолжительность. Переход на новый мощный режим составляет около 30 секунд, крутящий момент стабилизируется в течение примерно 40 секунд, а для стабилизации частоты вращения требуется около 60 секунд. При этом необходимо отметить, что с точки зрения качества электроэнергии именно частота вращения играет определяющую роль, так как именно ее значение определяет частоту тока в сети.

Инерционные характеристики дизель-генераторных установок обусловлены их конструктивными особенностями и не могут быть существенно изменены, поэтому основным инструментом повышения качества переходных процессов является совершенствование их систем управления.

Заключение

Проведенный анализ изменения показателей работы дизель-генераторных установок во время переходных процессов позволяет сделать следующие выводы:

- переходные процессы дизель-генераторов имеют колебательный характер, типичный для большинства энергетических установок;
- колебания параметров отражают способность системы адаптироваться к новым нагрузочным режимам;

- переход на новый нагрузочный режим обеспечивается реакцией системы топливоподачи на изменение нагрузки в результате управляющих сигналов;
- анализ данных, полученных при исследовании переходных процессов, таких как длительность переходного процесса и величина забросов параметров, позволяет оценить совершенство системы управления и наметить направления ее модернизации;
- исследования переходных процессов позволяют оценить динамику изменения важнейших показателей их работы, выявить критические аспекты переходных процессов и повысить их качество с целью сокращения времени, необходимого для восстановления заданной частоты вращения при изменении нагрузки.

Перспективным способом повышения качества переходных процессов дизель-генераторных установок является использование серверно-сетевых систем управления, обеспечивающих связанное воздействие на топливные системы дизельных двигателей, работающих параллельно и электрические характеристики генераторов.

Список литературы

1. Брежнев, В. И. Перспективы использования винторулевых колонок в составе судовых энергетических установок / В. И. Брежнев, В. А. Жуков // Морская радиоэлектроника. – 2022. – № 3(81). – С. 2-5. – EDN ACOODY.
2. Fuchs E. Power Quality in Power Systems and Electrical Machines / E. Fuchs, M. A. S. Masoum. — Second edition. — Academic Press, 2015. — 1140 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-800782-2.09989-9.
3. Белей, В. Ф. Оценка режимов работы судового дизель-генератора на основе диаграммы располагаемых мощностей / В. Ф. Белей, К. В. Коротких // Известия КГТУ. – 2021. – № 62. – С. 135-145. – DOI 10.46845/1997-3071-2021-62-135-145. – EDN STRJXY
4. Малышев, Ю. С. Имитационная модель дизель-генератора, работающего на судовую сеть при подключении импульсной нагрузки / Ю. С. Малышев, О. А. Бурмакин, С. В. Попов // Транспорт. Горизонты развития : Труды 4-го Международного научно-промышленного форума, Нижний Новгород-Новосибирск-Владивосток-Самара, 23–26 апреля 2024 года. – Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2024. – С. 37. – EDN QRALGP.
5. Виноградов А. А. Исследование распределения нагрузки судовых дизель-генераторных агрегатов при их параллельной работе / А. А. Виноградов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. - 2017. - №2(42). - С. 373-379. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-373-379
6. Попов, С. В. Исследование параллельной работы дизель-генераторов судовой электростанции / С. В. Попов, О. А. Бурмакин, Ю. С. Малышев // Научные проблемы водного транспорта. – 2021. – № 66. – С. 108-122. – DOI 10.37890/jwt.vi66.148. – EDN XGSQRR.
7. Попов С.В., Бурмакин О.А., Малышев Ю.С. Особенности параллельной работы дизель-генераторных агрегатов судовой электростанции. Научные проблемы водного транспорта. Выпуск 73 (4). – Н. Новгород: изд. ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2022. – с. 67 – 78, DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi73.313>
8. Белей, В. Ф. Повышение эффективности судовых дизель - генераторов за счет использования централизованной системы компенсации реактивной мощности / В. Ф. Белей // Известия КГТУ. – 2019. – № 54. – С. 145-153. – EDN LTXLZW.
9. Коробко, Г. И. Разработка и моделирование дизель-генератора с изменяемой частотой вращения в судовой единой электроэнергетической системе / Г. И. Коробко, О. С. Хватов, И. Г. Коробко // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2017. – № 1. – С. 55-61. – DOI 10.17588/2072-2672.2017.1.055-061. – EDN XSTWUH.

10. Перспективные варианты судовых электростанций с дизель-генераторами переменной частоты вращения / О. С. Хватов, Е. М. Бурда, И. А. Тарпанов, Н. И. Кшталтный // Труды 19-го международного научно-промышленного форума "Великие реки-2018" : Труды международного научно-промышленного форума. Материалы научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов, специалистов и студентов, Волжский, 15–18 мая 2018 года. – Волжский: Волжский государственный университет водного транспорта, 2018. – EDN ZCDYBV.
11. Kuznetsov, S. E. System of load distribution of ship diesel generators based on neural networks / S. E. Kuznetsov, N. A. Alekseev, A. A. Vinogradov // Modern Information Technologies and IT-Education. – 2018. – Vol. 14, No. 3. – P. 603-608. – DOI 10.25559/SITITO.14.201803.603-608. – EDN YYHQZ.
12. Жуков, В. А. Использование искусственного интеллекта для оценки надежности систем охлаждения судовых дизель-генераторов / В. А. Жуков, С. Г. Черный, Д. А. Мазин // Морская радиоэлектроника. – 2024. – № 3(89). – С. 22-26. – EDN VPUJDI.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Брежнев Владислав Игоревич, инженер 1-й категории, «Транснефть-Балтика», Санкт-Петербург, наб. Арсенальная, д. 11, литера А, e-mail: vladislav_br@list.ru

Жуков Владимир Анатольевич, докт. техн. наук, профессор, ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: Zhukov_vla@mail.ru

Vladislav I. Brezhnev, engineer of the 1st category, Transneft-Baltika, St. Petersburg, Arsenalnaya Embankment, 11, letter A, e-mail: vladislav_br@list.ru

Vladimir A. Zhukov, Dr Tech. Sc., Professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Dvinskaya St., 5/7, e-mail: Zhukov_vla@mail.ru

Статья поступила в редакцию 01.08.2025; опубликована онлайн 20.09.2025.
Received 01.08.2025; published online 20.09.2025.

УДК 62-242.3

DOI: 10.37890/jwt.vi84.619

Разработка стенда для определения сил трения в деталях цилиндропоршневой группы судового дизеля

С. Ю. Курицын

ORCID: 0009-0001-8061-4656

Ю. И. Матвеев

А. В. Соловьев

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

Аннотация. Поршневые кольца относятся к деталям, непосредственно влияющим на технико-эксплуатационные и технико-экономические показатели двигателя. Основная функция поршневых колец заключается в создании герметичности камеры сгорания. Выполнение данной задачи осуществляется в трудных условиях (знакопеременные нагрузки и скорость движения поршня, высокая температура, сила трения и др.). Поршневые кольца оказывают влияние не только на мощность, но и на КПД двигателя, который во многом зависит от эффективности сгорания топлива, тепловых и механических потерь, связанных с силой трения. На долю поршневых колец приходится порядка 40-50% от всех потерь на трение в двигателе. И поскольку ДВС (двигатель внутреннего сгорания) является неотъемлемым атрибутом современной жизни, большинство научных исследований посвящено уменьшению воздействия различных факторов, влияющих на КПД дизеля, на эффективность и на его ресурс при эксплуатации. В судовых условиях определить силу трения деталей цилиндропоршневой группы очень сложно. Поэтому для измерения значений силы трения в работе, разработан стенд, позволяющий произвести оценку взаимодействия поршневых колец с «зеркалом» цилиндра судового двигателя внутреннего сгорания. Исследование выполнено в рамках реализации научно-исследовательского проекта по формированию информационно-технологической платформы «Флот-Сервис-Судоремонт» для судов внутреннего и река-море плавания» (Шифр научной темы 06/ГЗ-2025-05).

Ключевые слова: Поршневые кольца, стенд, двигатель внутреннего сгорания, износ, поршень, уплотнение, эпюра давлений, трение, смазка, втулка цилиндра.

Development of a stand for determining the friction forces in the details of the cylinder piston group of marine diesel

Sergey Y. Kuritsyn

ORCID: 0009-0001-8061-4656

Yuri I. Matveev

Alexey V. Solovyov

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Piston rings are parts that directly affect the technical, operational and economic performance of the engine. The main function of piston rings is to ensure the tightness of the combustion chamber. This task is performed under difficult conditions (alternating loads and the speed of the piston, high temperature, friction, etc.). Piston rings affect not only the power, but also the efficiency of the engine, which largely depends on the efficiency of fuel combustion, thermal and mechanical losses associated with friction. Piston rings account for about 40-50% of all friction losses in the engine. And since the internal combustion engine (internal combustion engine) is an integral attribute of modern life, most scientific research is devoted to reducing the impact of various factors affecting diesel efficiency, efficiency and its service life. It is very difficult to determine the friction force of the cylinder piston group

parts in ship conditions. Therefore, to measure the values of the friction force in operation, a stand has been developed that makes it possible to evaluate the interaction of piston rings with the "mirror" cylinder of a marine internal combustion engine.

The research was carried out as part of a research project on the formation of the Fleet-Service-Ship Repair information technology platform for inland and river-sea navigation vessels (Scientific topic code 06/GZ-2025-05).

Keywords: Piston rings, stand, internal combustion engine, wear, piston, seal, pressure diagram, friction, lubrication, cylinder sleeve

Введение

Развитие двигателестроения во многом определяется потребностью в разных областях жизнедеятельности человека. Двигатель внутреннего сгорания является одним из основных источников как для создания движения, так и генерации электричества в различных сферах: промышленности, транспорте, сельском хозяйстве и т.д. Основным направлением развития двигателей внутреннего сгорания является повышение мощности, при возможном уменьшении эксплуатационных затрат, к которым прежде всего относится расход топлива и масла. Техничко-экономические показатели, также технико-эксплуатационные показатели в основном зависят от эффективности уплотнения деталей цилиндропоршневой группы [1,2,3]. Поршневые кольца можно отнести к первостепенным деталям цилиндропоршневой группы, от которых зависит не только технико-экономические показатели, влияющие на мощность двигателя, но и надёжность эксплуатации двигателя. КПД обуславливается такими факторами как топливная эффективность, тепловые потери, и соответственно механические потери.

Методы исследования

Топливная эффективность достигается следующими способами:

- полнотой сгорания;
- качественной регулировкой системы впрыска топлива;
- регулярным обслуживанием топливной системы;
- использованием топлива, предназначенного заводом строителем двигателя;
- эксплуатацией двигателя с очищенным топливом от механических примесей и воды;

Указанные способы во многом зависят от квалификации и ответственности обслуживающего персонала в машинном помещении.

Тепловые потери двигателя также можно уменьшить за счёт утилизации тепла от выпускных газов и воды внутреннего контура. Для отбора тепла от выпускных газов, на выхлопном трубопроводе от двигателя устанавливают утилизационные котлы, позволяющие обеспечить практически все потребители в ходовом режиме. Большинство современных судов, таких как RSD59 (постройка на верфях «Красное Сормово», «Окская судовой верфь», «Невский ЦСРЗ»), RSD-32М, (постройка на верфи «Окская судовой верфь»), PV300VD (постройка на верфи «Красное Сормово»), снабжены данными агрегатами. Утилизация тепла от внутреннего контура системы охлаждения дизеля менее эффективна, по сравнению с утилизацией от отработанных газов. Это связано с температурой теплоносителя. Если температура выхлопных газов высокооборотных дизелей достигает 600°C, то температура охлаждающей жидкости не превышает 95°C. Тем не менее, для увеличения КПД двигателя, проектами судов предусматривается отбор тепла от данной системы. В качестве примера можно привести экологическое судно проекта RT37, построенного Восточно-Сибирским Речным пароходством, где от системы охлаждения внутреннего контура дизель-

генераторов через теплообменные аппараты производится нагрев воды системы бытового водоснабжения и водяного отопления.

К механическим потерям относится сила трения, которая является причиной не только понижения КПД двигателя, но и факторами износа трущихся деталей [4,5]. Из всех пар трения двигателя можно выделить поршневые кольца – втулка цилиндра, которые работают, в отличие от других взаимодействующих звеньев, в трудных условиях (переменные нагрузки, высокая температура, сила трения). Потери на трение, при работе поршневых колец, приходятся до 50% от всех потерь трущихся деталей в двигателе [6].

Для уменьшения механических потерь фрикционной пары поршневые кольца – втулка цилиндра ведется много исследований по разным направлениям, такими как:

- поиск оптимальной формы поршневого кольца;
- влияние сил собственной упругости;
- нанесение различных покрытий на рабочую поверхность поршневого кольца;
- обеспечение равномерного и интенсивного смазывания трущихся поверхностей;

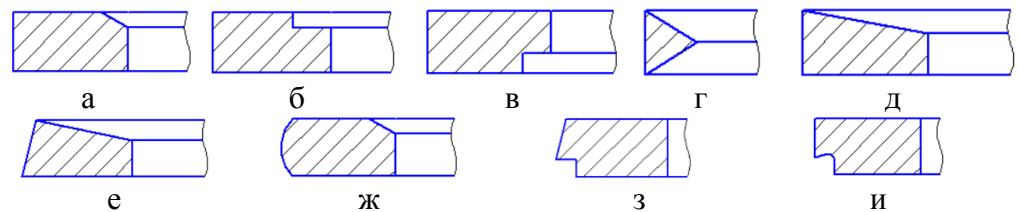


Рис. 1. Профили поршневых колец: а – прямоугольный; б – с верхним внутренним углом; в – с нижним внутренним углом; г – треугольный; д – несимметричный трапециевидный; е – конический; ж – бочкообразный; з – конический скребковый; и – скребковый

В настоящее время существует довольно большое количество разнообразных профилей поршневых колец (см. рисунок 1) каждый из которых разрабатывался для выполнения либо какой-то конкретной функции:

- снижение силы трения;
- снижений вибрации;
- увеличение отвода тепла от поршня (что актуально для поршней из алюминиевого сплава, не имеющего системы охлаждения);
- повышение износостойкости;
- лучшее распределение масла на поверхности «зеркала» цилиндра;
- защиты от заклинивания;

либо совмещений ряда функций, например трапециевидная форма кольца «д» позволяет увеличить отвод тепла от поршня из-за увеличенной площади контакта к стенке цилиндра, так и косвенно выполняет функцию очистки поршневой канавки от нагара, что уменьшает возможность «залегания» поршневых колец.

Любой из профилей поршневого кольца должен обеспечить плотность прилегания к «зеркалу» цилиндра. Данное требование необходимо выполнять для обеспечения основной функции поршневых колец – обеспечение герметичности камеры сгорания, причём на всех тактах рабочего цикла двигателя [7].

Плотность прилегания достигается за счёт собственной силой упругости кольца, которая зависит от материала поршневого кольца и способа изготовления. Силу собственной упругости можно графически отобразить в виде эпюры давления (см. рисунок 2) [8].

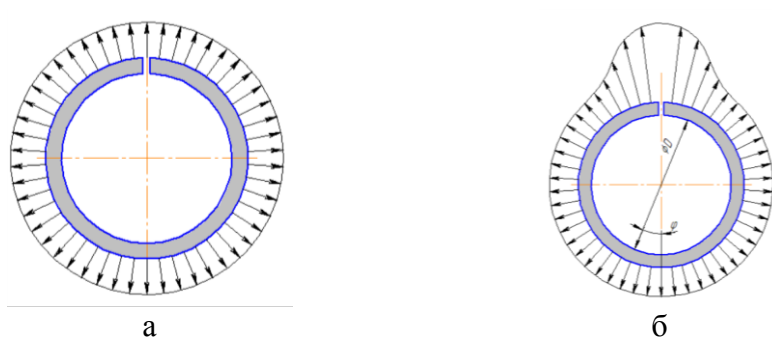


Рис. 2. Эпюры давлений поршневых колец: а – симметричная; б – грушевидная

Изображённые эпюры давлений показывают две особенности, заключающиеся в равномерности действия давления (рисунок 2а) и увеличении давления в районе «замка» (рисунок 2б). Равномерность давления по всей поверхности кольца применяется для нижних компрессионных и маслосъёмных колец, где давление от сгорания топлива не усиливает прижим поршневого кольца к зеркалу цилиндра. Грушевидная форма применяется для верхних компрессионных колец, где сила собственной упругости поршневого кольца увеличивается от действия расширения газов при сгорании топлива в камере сгорания. Данное обстоятельство вызвано ускоренным износом концов кольца, причиной которого служит «замок», через который отработанные газы с большой скоростью направляются в зону с пониженным давлением. Движущиеся газы высокой температуры сдувают масляную плёнку с поверхности втулки цилиндра, тем самым создавая условия работы фрикционной пары без смазки. Соответственно грушевидная форма эпюры давлений делается для создания равномерности износа поршневого кольца. Оптимальность распределения давления достигается путём выбора соответствующей технологии изготовления. Например, грушевидная эпюра достигается путём обточки по копиру.

Одним из действующих способов по уменьшению изнашивания трущихся деталей, является нанесение покрытий на рабочие поверхности поршневых колец [9,10,11]. Покрытия выполняют довольно большой спектр функций:

- уменьшение трибологических напряжений цилиндра с поршневым кольцом;
- обеспечение износостойкости;
- обеспечение хорошей прирабатываемости к стенке цилиндра с минимально возможным износом цилиндровой втулки;
- обеспечение смазки на рабочих поверхностях.

Существует несколько вариантов расположения покрытий на рабочей поверхности поршневого кольца: с полным покрытием рабочей поверхности, с расположением покрытия в центре рабочей кромки и с частичным покрытием рабочей поверхности (см. рисунок 3).

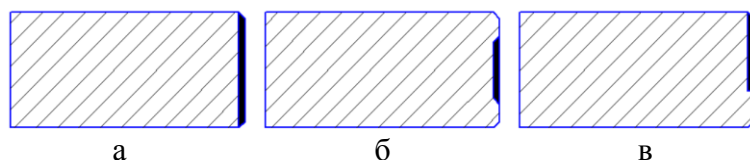


Рис. 3. Покрытия поршневых колец: а – с полным покрытием рабочей поверхности; б – с расположением покрытия в центре рабочей кромки; в – с частичным покрытием рабочей поверхности

В настоящее время применяют такие покрытия как хромовое (Cr), молибденовое (Mo), фосфатное (P), медное (Cu), оловянное (Sn), нитритное (Nt) и керамические покрытия. Качество покрытия определяется прежде всего способностью сохранности не только в процессе работы, но и на этапе монтажа поршневого кольца. К наиболее надёжным покрытиям относятся керамические покрытия и для их нанесения используют два эффективных способа:

- CVD (Chemical Vapor Deposition) - химическое осаждение покрытия из парообразной фазы;
- PVD (Physical Vapor Deposition) - физическое осаждение покрытия из парообразной фазы.

Каждое кольцо из комплекта работает в различных условиях, при которых осуществляется разные виды трений скольжений [12] (см. рисунок 4):

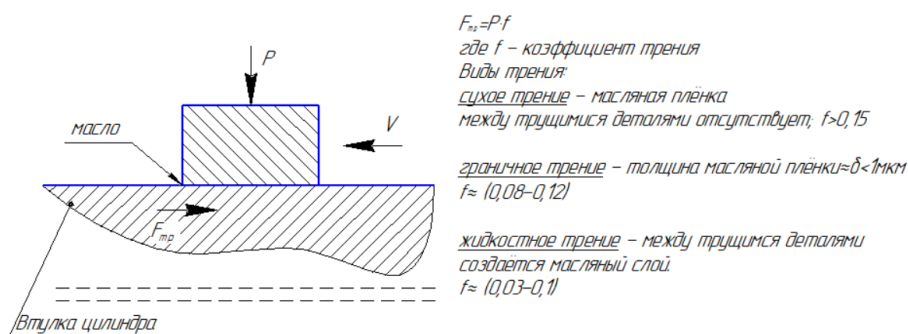


Рис. 4. Силы, действующие на поршневое кольцо во время перемещения поршня

Нижние кольца, воспринимают минимальные воздействия от температуры и давления на поверхность кольца увеличивающее его прижим к стенке цилиндра, поэтому работа колец происходит в режиме жидкостного трения, при котором между сопрягаемыми поверхностями образуется устойчивый масляный слой (см. рисунок 5).

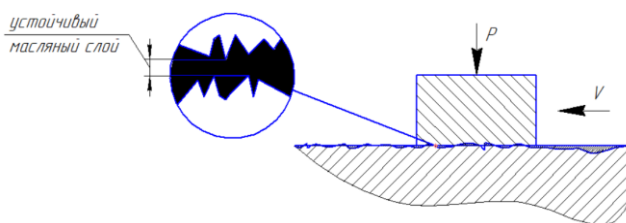


Рис. 5. Жидкостное трение

Основная нагрузка из всего комплекта поршневых колец (от высокой температуры и давления от сгорания топлива в камере сгорания и др.) воспринимается верхним компрессионным кольцом. Дополнительно его условия работы усугубляются граничным трением, отличающимся от жидкостного трения, толщиной масляной плёнки. Её размер соответствует величине 2-3 молекул смазочного масла, и по этой причине, от воздействия нагрузок, связанных с условиями работы поршневого кольца, данный слой неустойчив. Его разрушение приводит к сухому трению и как следствие к ускоренному износу [13].

При сухом и граничном трении в процессе работы происходят изменения шероховатости на поверхности сопрягаемых деталей. Начальное состояние каждой детали, перед установкой в двигатель, определяется шероховатостью поверхности, получаемой на стадии их изготовления. Нормы для чистоты обработки поверхностей

регламентированы ГОСТами на соответствующие детали. Для поршневых колец шероховатость рабочей поверхности должна быть не более $Ra\ 0.63$ (ГОСТ7133-80), а для втулок цилиндра с внутренним диаметром меньше 160мм – не более $Ra\ 0.32$, свыше 160мм – не более $Ra\ 0.63$ (ГОСТ7274-80). «Чистота» обработки определяет размер неровностей, находящихся на поверхностях деталей, и состоит из выступов и впадин. Взаимодействие двух тел осуществляется по выступам, а не всей поверхности тел, вследствие чего происходит увеличение давления контакта (см. рисунок 6).

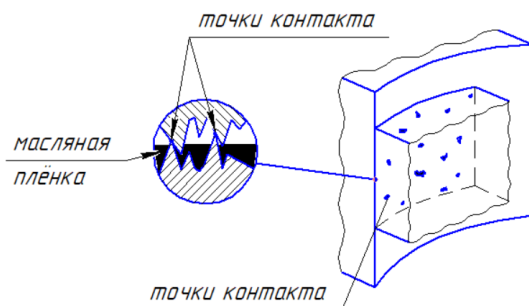


Рис. 6. Взаимодействие трущихся деталей в точках контакта

В процессе работы поршневых колец, площадь контакта между трущимися поверхностями увеличивается, при этом давление контакта уменьшается, за счёт увеличения радиуса кривизны неровностей (см. рисунок 7).

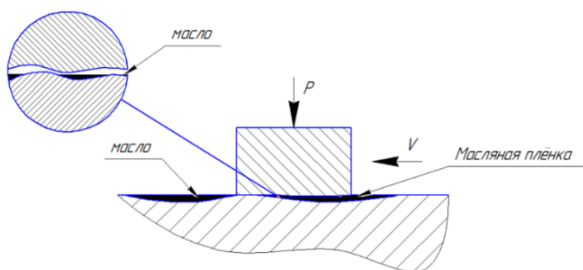


Рис. 7. Взаимодействие трущихся деталей в точках контакта

Данное изменение рабочих поверхностей происходит до наступления равновесной шероховатости, при которой обеспечивается наиболее эффективный и продолжительный период работы.

Постепенное сглаживание поверхностей приводит в конечном счёте к её выравниванию, вследствие чего может произойти истирание масляного слоя. Отсутствие смазки продолжает работу двух тел с сухим трением, при котором происходит резкое увеличение температуры в зоне контакта. Рост температуры может продолжаться до температуры плавления металла, при которой начинают образовываться сварные точки – молекулярное схватывание металла [14] (см. рисунок 8).

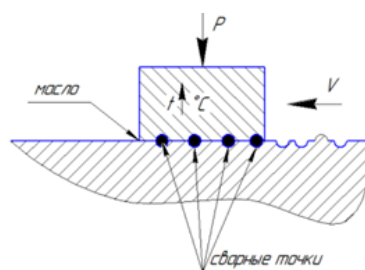


Рис. 8. Образование сварных точек

Образующие сварные точки изменяют сглаженную поверхность, делая её вновь шероховатой. Причём полученная шероховатость ведёт к повышенному износу сопрягаемых поверхностей, понижая не только эффективность работы дизеля, но и увеличивая риски до его полного отказа.

Результаты испытаний

Анализируя всю вышеизложенную информацию, можно с уверенностью сказать, что фрикционное взаимодействие пары трения поршневое кольцо – втулка цилиндра является ключевой задачей для возможности увеличения технико-экономических показателей двигателя и его КПД. Для оценки величины силы трения предложен стенд, принципиальная схема, которого отображена на рисунке 9.

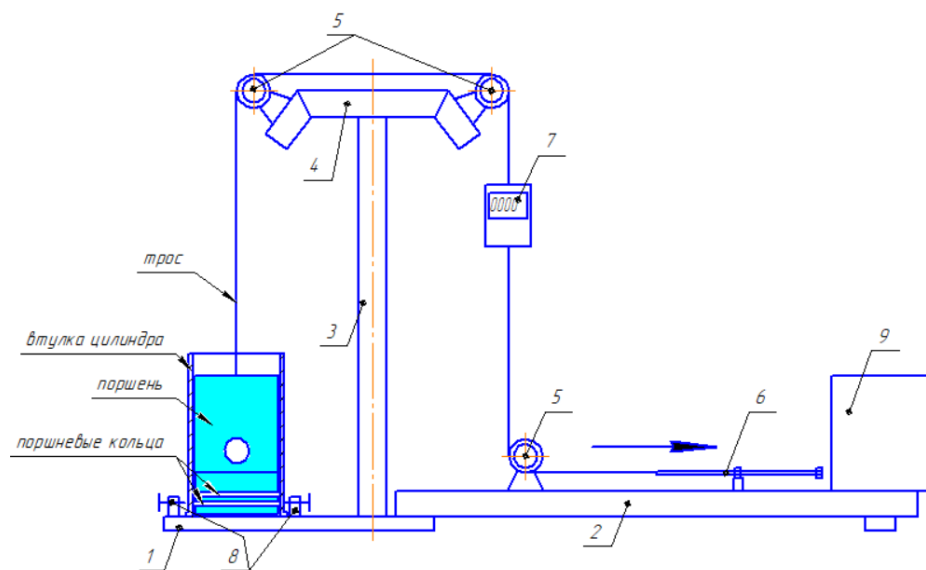


Рис. 9. Принципиальная схема стенда для замера величины силы трения: 1 – основание; 2 – опора; 3 – стойка; 4 – перекладина; 5 – ролик; 6 – натяжной винт; 7 – динамометр; 8 – центрирующие и фиксирующие болты; 9 – электродвигатель на подвижной опоре

Общий вид стенда показан на рисунке 10.



Рис. 10. Общий вид стенда для замера величины силы трения: 1 – основание; 2 – опора; 3 – стойка; 4 – перекладина; 5 – ролик; 6 – натяжной винт; 7 – динамометр; 8 – центрирующие и фиксирующие болты; 9 – электродвигатель на подвижной опоре

Принцип работы стенда заключается в следующем: на основание позиции 1 устанавливается втулка цилиндра, таким образом, чтобы её ось совпадала с осью тросика в рабочем положении (натяннутом) (см. рисунок 11). Совмещение оси втулки с осью троса осуществляется с помощью центрирующих болтов поз. 8. После совмещения осей втулка цилиндра фиксируется с помощью этих же болтов (см. рисунок 12).



Рис. 11. Общий вид стенда для замера величины силы трения



Рис. 12. Установка центрирующих и фиксирующих болтов

Перед установкой поршня во втулку, на «зеркало» цилиндра наносится подогретое до температуры 80°C смазочное масло. Для эксперимента применяется смазочное масло марки М-10В₂ (ГОСТ17479.1-2015). Повышение температуры масла позволяет уменьшить его вязкость, что даёт возможность нанести смазочное масло на «зеркало» цилиндра с минимальным слоем. Далее во втулку цилиндра устанавливается поршень с вмонтированным в него поршневым пальцем. К поршневому пальцу крепится трос, который прокладывается через ролики поз. 5. Между верхними и нижним роликами устанавливается динамометр (см. рисунок 13), с погрешностью измерения 0,05г.



Рис. 13. Установка динамометра

Трос соединяется с помощью такелажных деталей (карабин, вертлюг и зажим) с натяжным винтом, который вращаясь, от электродвигателя с передвижной опорой перемещается (см. рисунок 14) в сторону противоположенной стойки стэнда.



Рис. 14. Детали стэнда: а – детали соединения троса с натяжным винтом; б – упор, относительно которого перемещается натяжной винт

Благодаря перемещению натяжного винта создаётся усилие, отображающее на табло динамометра. Данная величина увеличивается до тех пор, пока поршень не начинает своё движение. Отображённая величина будет определять полное сопротивление движению поршня, включая и силу трения. Это обстоятельство позволяет проводить замеры с разными условиями и соответственно разность показателей, полученных при испытаниях, будет показывать на сколько эффективны были предложены те или иные мероприятия по уменьшению силы трения.

Заключение

Предлагаемый стенд позволяет решить довольно большой перечень вопросов, связанных с уменьшением механических потерь в деталях цилиндропоршневой группе и как следствие увеличение мощности и КПД двигателя:

1. Влияние силы собственной упругости поршневого кольца на величину сопротивления движению поршня;
2. Определять величину сопротивления движения поршня с различными профилями поршневых колец;
3. Качество распределения масла по поверхности втулки цилиндра;
4. Влияние разных сортов масла на величину сопротивления движению поршня.

Список литературы

1. Повышение эффективности уплотнений деталей цилиндропоршневой группы судовых дизелей / Ю. И. Матвеев, М. Ю. Храмов, В. В. Колыванов, С. Ю. Курицын // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2023. – № 3. – С. 49-55. – DOI 10.24143/2073-1574-2023-3-49-55.
2. Повышение работоспособности деталей цилиндропоршневой группы судовых дизелей / Ю. И. Матвеев, М. Ю. Храмов, В. В. Колыванов, С. Ю. Курицын // Научные проблемы водного транспорта. – 2023. – № 76. – С. 99-110. – DOI 10.37890/jwt.vi76.400.
3. Влияние величины «замка» поршневого кольца на работоспособность нового уплотнения деталей цилиндропоршневой группы судового дизеля / Ю. И. Матвеев, С. Ю. Курицын, С. С. Казаков, Р. Р. Жамалов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2025. – № 1. – С. 37-48. – DOI 10.24143/2073-1574-2025-1-37-48.
4. Костецкий Б.И. Структурно-энергетическая приспособляемость материалов при трении // Трение и износ, 1985. – Т. 6, № 2. – С. 201-211
5. Трение и теплопередача в поршневых кольцах двигателей внутреннего сгорания / М. Р. Петриченко, Р. М. Петриченко, А. Б. Канищев, А. Ю. Шабанов. – Ленинград : Ленинградский государственный технический университет, 1990 – 248 с.
6. Гинцбург Б.Я. Теория поршневого кольца / Б.Я. Гинцбург. М: Машиностроение, 1979. – 247.
7. Стендовые испытания нового уплотнения деталей цилиндропоршневой группы судового ДВС / Ю. И. Матвеев, С. Ю. Курицын, С. С. Казаков, Р. Р. Жамалов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2024. – № 2. – С. 48-56. – DOI 10.24143/2073-1574-2024-2-48-56.
8. Матвеев, Ю. И. Методики определения эпюры давлений поршневых компрессионных колец судовых дизелей / Ю. И. Матвеев, С. Ю. Курицын // Транспорт. Горизонты развития : Труды 3-го Международного научно-промышленного форума, Нижний Новгород, 14–16 июня 2023 года. – Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2023. – С. 17.
9. Лобанов М.Л., Кардонина Н.И., Россина Н.Г., Юровских А.С. Защитные покрытия : учебное пособие / М.Л. Лобанов, Н.И. Кардонина, Н.Г. Россина, А.С. Юровских. – Екатеринбург : Изд-во Урал. Ун-та, 2014. – 200с. ISBN 978-5-7996-1101-9
10. Миронов, Е. Б. Современные технологии повышения долговечности поршневых колец / Е. Б. Миронов // Вестник НГИЭИ. – 2010. – Т. 2, № 1(1). – С. 75-85.
11. Каляшина, А. В. Повышение эксплуатационных характеристик поршневых колец с применением эффективных антифрикционных и износостойких материалов / А. В. Каляшина, А. С. Гаврилюк // Вестник МГТУ "Станкин". – 2019. – № 4(51). – С. 51-55.
12. Крагельский, И.В. и др. Основы расчетов на трение и износ. – М. «Машиностроение». – 1977.
13. Крагельский, И.В. Трение и износ. – М. «Машиностроение». – 1968. – 480с.
14. Матвеев, Ю. И. Повышение работоспособности судовых дизелей в условиях эксплуатации / Ю. И. Матвеев, М. Ю. Храмов, С. Ю. Курицын // Развитие энергетики водного транспорта, информационных и энергосберегающих технологий : сборник

материалов I Всероссийской конференции, Астрахань, 12–13 декабря 2023 года. – Астрахань: Волжский государственный университет водного транспорта, 2023. – С. 124-131.

References

1. Improving the sealing efficiency of parts of the cylinder piston group of marine diesel engines / Yu. I. Matveev, M. Y. Khramov, V. V. Kolyvanov, S. Y. Kuritsyn // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and Technology. - 2023. – No. 3. – pp. 49-55. – DOI 10.24143/2073-1574-2023-3-49-55.
2. Improving the operability of parts of the cylinder piston group of marine diesels / Yu. I. Matveev, M. Y. Khramov, V. V. Kolyvanov, S. Y. Kuritsyn // Scientific problems of water transport. – 2023. – No. 76. – pp. 99-110. – DOI 10.37890/jwt.vi76.400.
3. The influence of the value of the "lock" of the piston ring on the operability of the new sealing of the parts of the cylinder piston group of a marine diesel engine / Yu. I. Matveev, S. Y. Kuritsyn, S. S. Kazakov, R. R. Zhamalov // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and Technology. – 2025. – No. 1. – pp. 37-48. – DOI 10.24143/2073-1574-2025-1-37-48.
4. Kostetsky B.I. Structural and energy adaptability of materials under friction// Friction and wear, 1985. – Vol. 6, No. 2. – pp. 201-211
5. Friction and heat transfer in piston rings of internal combustion engines / M. R. Petrichenko, R. M. Petrichenko, A. B. Kanishchev, A. Y. Shabanov. Leningrad : Leningrad State Technical University, 1990 – 248 p.
6. Ginzburg B.Ya. Theory of the piston ring / B.Ya. Ginzburg. Moscow: Mashinostroenie, 1979. – 247.
7. Bench tests of a new seal for parts of the cylinder piston group of a marine internal combustion engine / Yu. I. Matveev, S. Y. Kuritsyn, S. S. Kazakov, R. R. Zhamalov // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and Technology. – 2024. – No. 2. – pp. 48-56. – DOI 10.24143/2073-1574-2024-2-48-56.
8. Matveev, Yu. I., Kuritsyn, S. Y. Methods for determining pressure diagrams of piston compression rings of marine diesel engines. Horizons of Development : Proceedings of the 3rd International Scientific and Industrial Forum, Nizhny Novgorod, June 14-16, 2023. Nizhny Novgorod: Volga State University of Water Transport, 2023, p. 17.
9. Lobanov M.L., Kardonina N.I., Rossina N.G., Yurovskikh A.S. Protective coatings : a textbook / M.L. Lobanov, N.I. Kardonina, N.G. Rossina, A.S. Yurovskikh. Yekaterinburg : Ural Publishing House. University, 2014. – 200c. ISBN 978-5-7996-1101-9
10. Mironov, E. B. Modern technologies for increasing the durability of piston rings / E. B. Mironov // Bulletin of the NGIEI, 2010, vol. 2, No. 1(1), pp. 75-85.
11. Kalyashina, A.V. Improving the performance of piston rings using effective antifriction and wear-resistant materials / A.V. Kalyashina, A. S. Gavriluk // Bulletin of MSTU "Stankin". – 2019. – № 4(51). – Pp. 51-55.
12. Kragelsky, I.V. and others. Fundamentals of calculations for friction and wear. – M. "Mechanical Engineering". – 1977.
13. Kragelsky, I.V. Friction and wear. – M. "Mechanical Engineering". – 1968. – 480 p.
14. Matveev, Yu. I. Improving the efficiency of marine diesel engines in operating conditions / Yu. I. Matveev, M. Y. Khramov, S. Y. Kuritsyn // Development of water transport energy, information and energy-saving technologies : proceedings of the I All-Russian Conference, Astrakhan, December 12-13, 2023. Astrakhan: Volga State University of Water Transport, 2023. pp. 124-131.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Курицын Сергей Юрьевич, ассистент кафедры ЭСЭУ (Эксплуатации судовых энергетических установок) Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, г. Нижний Новгород, Ул. Нестерова, 5, ауд. 667, e-mail: KuritsynnSergey@yandex.ru

Sergey Y. Kuritsyn, assistant of the Department of ESEU (Operation of Ship power plants) Volga State University of Water Transport, 603951, Nizhny Novgorod, Nesterova str., 5, e-mail: KuritsynnSergey@yandex.ru

Матвеев Юрий Иванович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой Эксплуатации судовых энергетических установок, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: matveeveseu@mail.ru

Yuri I. Matveev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951, e-mail: matveeveseu@mail.ru

Соловьёв Алексей Валерьевич, д.т.н., доцент, и.о. директора Верхне-Волжского филиала ФАУ «Российский Речной Регистр», 603001, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, ул. Рождественская, 38в e-mail: avsolovev@rfclass.ru

Alexey V. Soloviev Dr. Sci. (Eng), deputy director The Federal Autonomous Institute Russian River Register Upper Volga Branch-Office 38v Rozhdestvenskaya Str., Nizhniy Novgorod, 603001, Russian Federation e-mail: avsolovev@rfclass.ru

Статья поступила в редакцию 20.05.2025; опубликована онлайн 20.09.2025.
Received 20.05.2025; published online 20.09.2025.

УДК 621.125

DOI: 10.37890/jwt.vi84.639

Результаты экспериментального исследования теплофизических параметров современных главных высокооборотных электронно-управляемых двигателей

А.В. Лисаченко

ORCID: 0009-0007-9537-3692

Н.И. Николаев

ORCID: 0000-0003-1319-3609

В.В. Герасиди

ORCID: 0009-0008-1673-3192

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

Аннотация. В работе представлены результаты теплотехнических испытаний современных электронно-управляемых высокооборотных главных двигателей фирмы Caterpillar серии 3500, установленных на морских судах. Экспериментальные исследования проводились в течение 10 лет на выборке из 80 двигателей, эксплуатирующихся на морских буксирах. Накопленный опыт в проведении экспериментальных исследований контроля технического состояния безразборным методом диагностики позволит перейти от классических подходов технической эксплуатации до новых, входящих в систему удаленного контроля и управления судовых технических средств автономных судов в эксплуатации. Методика экспериментального исследования включает классический подход к проведению таких испытаний и современный подход с передачей данных в офис компании судовладельца. В ходе исследований получен обширный информационно-статистический банк данных по теплофизическим параметрам (давление наддувочного воздуха, температура отработавших газов, расход топлива) для моделей двигателей 3512, 3516 в широком диапазоне нагрузок, преимущественно на частичных режимах работы. Построены обобщенные зависимости теплофизических параметров для каждой модели. Показано, что накопленный опыт диагностики позволяет перейти от классических методов эксплуатации к системам удаленного мониторинга и управления судовыми техническими средствами, что является основой для развития автономного судовождения. Разработанная методика может быть рекомендована для применения на других типах высокооборотных двигателей морских судов.

Ключевые слова: электронно-управляемый двигатель, контроль, техническое состояние, диагностика, методика, экспериментальное исследование

Results of an experimental study of the thermophysical parameters of modern high-speed electronically controlled main engines

Alexey V. Lisachenko

ORCID: 0009-0007-9537-3692

Nikolay I. Nikolaev

ORCID: 0000-0003-1319-3609

Viktor V. Gerasidi

ORCID: 0009-0008-1673-3192

Admiral Ushakov State Maritime University, Novorossiysk, Russia

Abstract: This paper presents the results of thermotechnical tests of modern electronically controlled high-speed main engines from the Caterpillar 3500 series, installed on marine vessels. Experimental studies were conducted over 10 years on a sample of 80 engines operating on marine tugboats. A condition monitoring methodology was developed, combining classical testing approaches with modern methods of remote data transmission and analysis. The research resulted in an extensive informational and statistical database on thermophysical parameters (boost pressure, exhaust gas temperature, fuel consumption) for engine models 3512, 3516 under a wide range of loads, predominantly at partial modes. Generalized dependencies of the thermophysical parameters for each model were constructed. It is shown that the accumulated diagnostic experience enables a transition from classical maintenance methods to remote monitoring and control systems for ship technical equipment, forming a basis for the development of autonomous navigation. The developed methodology can be recommended for application to other types of marine high-speed engines.

Keywords: high-speed diesel engine, electronic control system, technical diagnostics, thermophysical parameters, partial loads, marine power plant, remote monitoring

Развитие морского флота Российской Федерации, включая суда обеспечения, буксиры и суда типа «река-море», характеризуется активным внедрением современных высокооборотных двигателей (ВОД) с электронными системами управления. Выполненный анализ, построенных морских судов портового флота в РФ, показал, что (рисунок 1): большинство двигателей импортного производства; 69% доли ВОД - это двигатели фирмы Caterpillar; значительную часть времени эксплуатации ВОД работают на частичных нагрузках (менее 50% от номинальной); наработка ВОД составляет до 2500 часов в год; такие ВОД предполагают регулярные регламентные работы, которые в настоящее время затруднены; в процессе эксплуатации ВОД зарождаются отказы и повреждения на частичных нагрузках, а существующая система предупреждения и защиты двигателей, например, Caterpillar, ориентирована на режимы работы двигателей близким к номинальным.

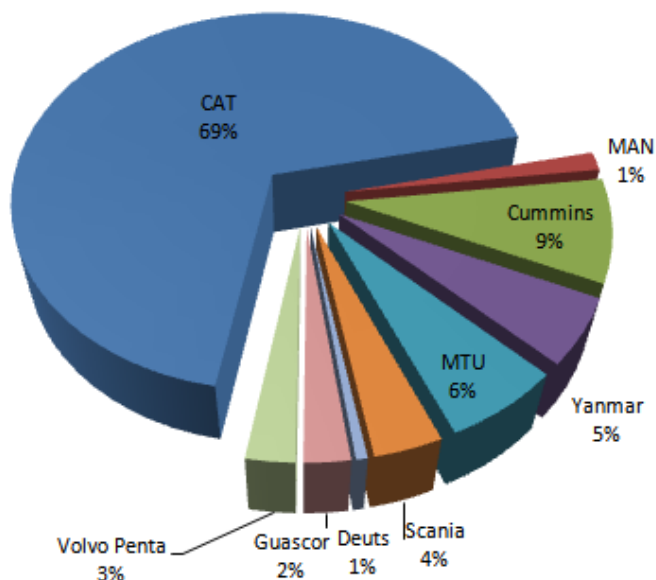


Рис. 1. Диаграмма распределения по производителям судовых высокооборотных двигателей, устанавливаемых в качестве главных [1]

Отсутствие сервисного обслуживания электронно-управляемых ВОД, возникающие отказы на частичных нагрузках и повреждения элементов ВОД и т.д.,

приводят к снижению безопасности мореплавания, простоя судов, значительным затратам судовладельцев на ремонт. В связи с этим, актуальны задачи, связанные с комплексом мер по контролю, обобщению и разработке предложений по нормированию параметров работы ВОД на частичных нагрузках.

Анализ литературных источников показал, что большая часть работ российских ученых и зарубежных посвящена теоретическому исследованию энергетического оборудования. Для главных ВОД описываются общие признанные недостатки технической эксплуатации или конструкционные особенности двигателей. Однако ценной информации, касающейся эксплуатации современных главных ВОД, и в разных отраслях промышленности и на флоте, работающих на различных видах топлива, нет. Например, теплотехнический контроль ВОД в эксплуатации по значениям важных параметров для работы ВОД, по которым можно было бы оценить техническое состояние (хорошее, удовлетворительное, неудовлетворительное) и спрогнозировать возможную неисправность главных ВОД, для предотвращения аварий, которые приведут к нарушению безопасности мореплавания и большим эксплуатационным затратам.

Контроль за качеством процесса сгорания топлива и улучшения эксплуатационных показателей судовых ВОД и СОД рассматривается в работах [2-7]. Выполняется обобщение рабочих параметров ВОД и СОД и их диагностика в процессе эксплуатации на основе показателей мощности, стохастических процессов судовой электрической системы. Рассматриваются основные понятия вибрационного мониторинга состояния и диагностики энергетического оборудования в целом.

Однако, в настоящее время, классификационные общества вводят в практику методы освидетельствования судов на основе данных о фактическом состоянии, с применением методов и средств технического диагностирования МОД и СОД в эксплуатации [8]. Таким образом, разработка и внедрение методики контроля ТС ВОД сегодня является актуальной, как для судовладельца в экономии эксплуатационных расходов, так и для надзорных органов при освидетельствовании механизмов.

Таким образом, анализ условий эксплуатации, литературных источников, отказов и неисправностей современных ВОД показывает:

- ВОД фирмы «Caterpillar» находят широкое применение на морских судах вспомогательного флота РФ;
- двигатели автоматизированы и управление рабочим процессом осуществляет электронная система, в которую запрограммированы постоянные предельные значения рабочих параметров независимо от режима эксплуатации;
- основными режимами работы главных ВОД являются режимы малых и частичных нагрузок;
- малые часы наработки до 2000-2500 часов в год;
- кратковременные режимы главных ВОД во всем диапазоне изменения нагрузки от холостого хода до номинальной;
- все отказы и повреждения, элементов ВОД, были выявлены в ходе контроля теплофизических параметров при эксплуатации на частичных режимах и режимах пониженных нагрузок.

Целью работы является - формирование комплекса научно-обоснованных технических решений оценки технического состояния высокооборотных двигателей Caterpillar (CAT) морских судов на основе контроля, обобщения и разработки рекомендаций по нормированию теплофизических параметров в широком диапазоне изменения режимов работы.

Объектами экспериментального исследования являются электронно-управляемые ВОД фирмы "Caterpillar" моделей CAT 3512B и CAT 3516B, установленные в качестве главных двигателей на судах вспомогательного флота серии "Б", "Т". Двигатели соответствуют международным экологическим нормам Tier 3/Stage IIIA

благодаря технологии ACERT (Advanced Combustion Emissions Reduction Technology), которая интегрирует системы топливоподачи, газообмена и электронного управления [9, 10].

Основной задачей теплотехнических испытаний ВОД, является анализ работы пропульсивной установки судна в целом и определение технического состояния двигателя в частности. Например, на судах вспомогательного флота Азово-Черноморского бассейна преобладают электронно-управляемые ("Electronic Control") высокооборотные двигатели фирмы Caterpillar (рисунок 2). Оснащение их блоком электронного управления, позволяет изменять, получать и контролировать рабочие параметры и хранить историю эксплуатации с момента постройки двигателя. Однако производители таких двигателей не дают полную информацию по действиям при возникновении отказа, в свою очередь, предлагают свои услуги на Российском рынке, что негативно сказывается на оперативность управления технической эксплуатацией флота [11-14].

Типы судов								
Кол-во	10		4		2		2	
Пропульсивная установка								
	винторулевые колонки		дизель-редукторная		дизель-редукторная			
Кол-во	24				8			
Двигатели								
	CAT C 32ACERT				CAT 3512B, CAT 3516B			
Кол-во	4		10		8			

Рис. 2. Объекты экспериментального исследования

Из рисунка 2 видно, что модель CAT 3500B составляет максимальное количество двигателей и входит во все пропульсивные установки и комплексы исследуемых судов. Технические характеристики исследуемых главных двигателей определены заводом-изготовителем в соответствии с международными стандартами (SAE J1349, ISO 3046/1, DIN 6271, BS 5514) и представлены в таблице 1. Из таблицы 1 видно, что двигатели CAT3512, CAT 3516 - V-образные под углом 60°. На всех исследуемых двигателях установлены электронные насос-форсунки, которые в процессе эксплуатации могут менять количество цикловой подачи топлива, заданной от блока электронного управления.

Методика эксперимента включала проведение теплотехнических испытаний с пошаговым изменением частоты вращения коленчатого вала и фиксации теплофизических параметров. Контролировались давление наддувочного воздуха,

температура отработавших газов, расход топлива, нагрузка и удельный расход топлива.

Таблица 1

Технические характеристики двигателей CAT 3500B

Наименование	CAT 3512B	CAT 3516B
Мощность Ne, кВт	700-1200	1100-2100
Номинальная частота вращения коленчатого вала двигателя, мин ⁻¹	1600-1925	
Частота вращения холостого хода, мин ⁻¹	650	
Число и расположение цилиндров	12 V-образным расположением под углом 60°	16 V-образным расположением под углом 60°
Диаметр цилиндра, мм	170	
Ход поршня, мм	190	
Степень сжатия	13,5:1	
Схема всасывания свежего заряда воздуха	Чисто газотурбинный наддув	
Объем одного цилиндра, л	4,3	
Общий объем цилиндров, л	51,8	69,1
Направление вращения коленчатого вала (со стороны маховика)	Против часовой стрелки (стандартное исполнение)	
	По часовой стрелки (индивидуальный заказ)	
Способ впрыска топлива	Электронные насос-форсунки	
Способ запуска	Пневмо стартер	
Расчетное противодействие в системе отработавших газов, кПа	2,5	
Максимальное допустимое противодействие отработавших газов, кПа	5,0	

Сбор данных осуществлялся как классическими методами (с помощью переносных диагностических комплексов), так и путем дистанционного съема информации с бортовой системы электронного управления (БЭУ) двигателя с последующей передачей в береговой центр обработки данных.

Результаты испытаний, как пример, двигателей CAT 3512B морских буксиров серии «Б» приведены на рисунках 3-7.

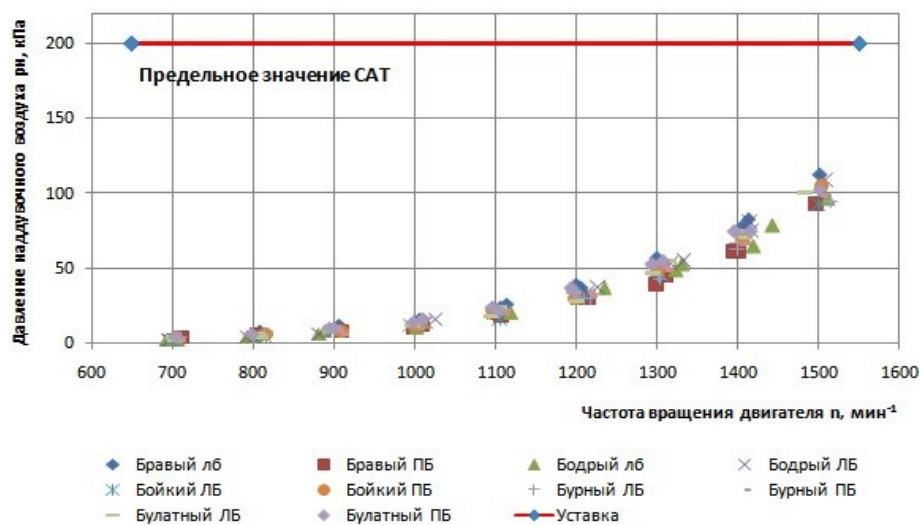


Рис. 3. Зависимость давления наддувочного воздуха от частоты вращения двигателей CAT3512B морских буксиров серии «Б»

Анализ зависимости давления наддувочного воздуха от частоты вращения (Рис. 1) выявил, что в диапазоне нагрузок 30–40% $\overline{Ne}_{\text{ном}}$ (при частоте вращения 650–1200 мин^{-1}) значение давления минимально (0–50 кПа). Его интенсивный рост наблюдается при дальнейшем увеличении частоты вращения, что указывает на эффективную работу системы наддува только на средних и высоких нагрузках.

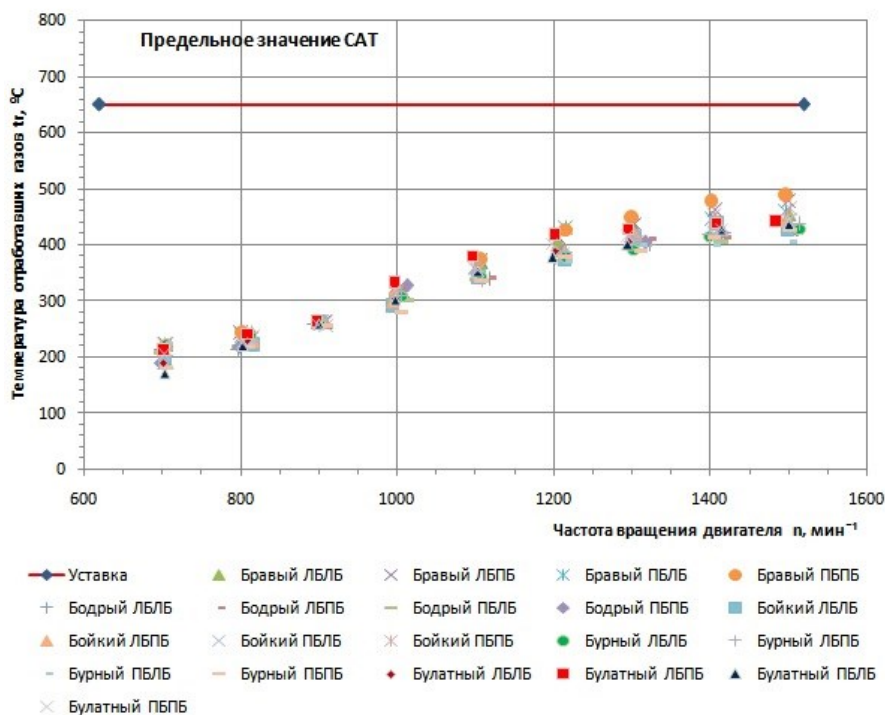


Рис. 4. Зависимость температуры отработавших газов от частоты вращения двигателей CAT3512B морских буксиров серии «Б»

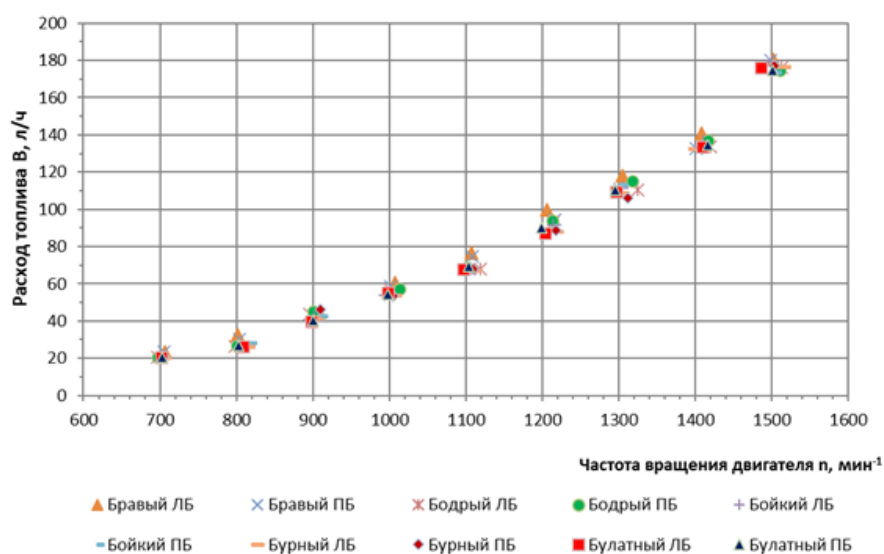


Рис. 5. Зависимость расхода топлива от частоты вращения двигателей CAT3512B морских буксиров серии «Б»

Значение температуры отработавших газов исследуемых двигателей лежат в пределах 400 - 500°C (рисунок 4) на режимах, близких к эксплуатационным, и не выходят за пределы значений (650 °C), установленных заводом изготовителем.

На рисунке 5 показана зависимость расхода топлива двигателей CAT 3512B от частоты вращения двигателя. Так можно сравнить нагруженность двух двигателей на одном судне, либо на серии судов.

Информация о расходе топлива поступает на монитор персонального компьютера через сервисную программу CAT ET от БЭУ, который получил данное значение, рассчитав по заданному алгоритму взаимодействия значений теплофизических параметров (частота вращения двигателя, нагрузка на двигатель, атмосферное давление), полученных от датчиков двигателя в зависимости от режима работы двигателя.

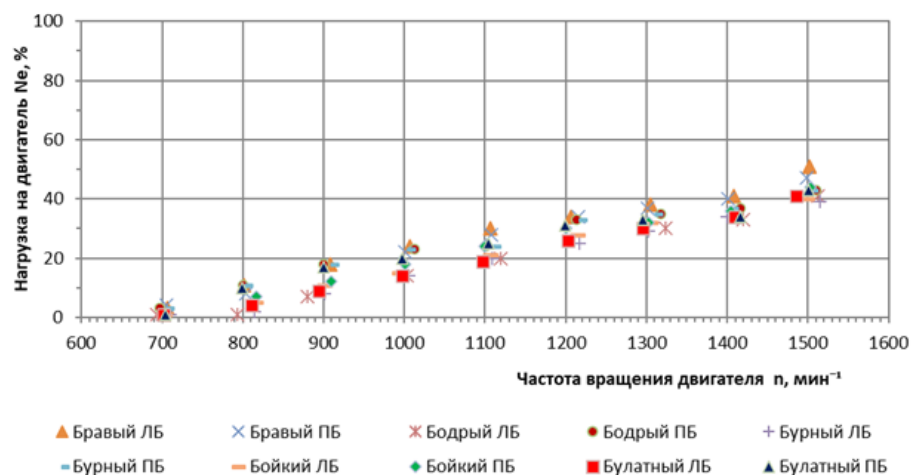


Рис. 6. Зависимость нагрузки от частоты вращения двигателей CAT3512B морских буксиров серии «Б»

БЭУ выводит на экран оператора зависимость нагрузки $\overline{Ne}_{ном}$, % на двигатель от частоты вращения n , мин^{-1} (рисунок 6). Что является примером работы датчика частоты вращения, который передает сигнал в систему БЭУ для сравнения с требуемым значением положения рукоятки оборотов на ходовом мостике. Из рисунка видно, что на всем диапазоне изменении режимов работы исследуемых двигателей морских буксиров, нагрузка не превысила $50\%\overline{Ne}_{ном}$.

Так по рисунку 7 видно, как изменяются значения удельного расхода топлива в зависимости от частоты вращения двигателя. Например, двигатель ЛБ м/б «Бравый» при нагрузке $40\%\overline{Ne}_{ном}$ имеет более повышенный расход топлива, чем двигатели остальных судов. А рисунок 5 показывает, что нагрузка м/б «Бравый» равной $40\%\overline{Ne}_{ном}$ соответствует 1400 мин^{-1} . Двигатели судна, например, м/б «Булатный» при нагрузке $40\%\overline{Ne}_{ном}$ достигают 1500 мин^{-1} соответственно с большим расходом топлива равным 176 л/ч , чем расход топлива м/б «Бравый» равный 135 л/ч .

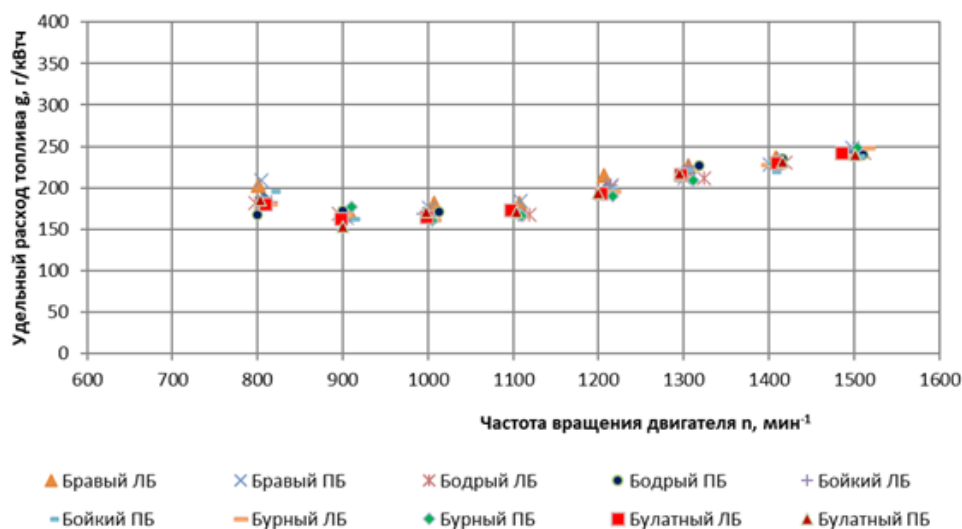


Рис. 7. Зависимость удельного расхода топлива от частоты вращения двигателей CAT3512B морских буксиров серии «Б»

Следовательно, рисунок 6 показывает наиболее оптимальный (эффективный) режим работы двигателей. Например, м/б «Бравый» при нагрузке $19\%\overline{Ne}_{ном}$ имеет удельный расход топлива равным 180 г/кВтч , а м/б «Булатный» - 153 г/кВтч . Такой анализ режимов работы судов позволяет определить техническое состояние двигателей в любой момент времени, а сделать вывод о продлении ремонтного интервала в зависимости от состояния позволит диагностика теплофизических параметров за указанный промежуток времени [15-17].

Заключение

Анализ отказов и неисправностей главных высокооборотных двигателей показал, что аварии систем и элементов высокооборотных двигателей Caterpillar являются результатом работы двигателей на частичных нагрузках и следствием отсутствия рекомендаций по нормированию теплофизических параметров на этих режимах.

Экспериментальные исследования теплофизических параметров главных высокооборотных двигателей Caterpillar моделей 3512, 3516 позволили собрать и накопить информационно-статистический банк данных теплофизических параметров в широком диапазоне изменения режимов работы.

Разработанная методика контроля технического состояния ВОД может быть рекомендована для применения на других типах высокооборотных двигателей морских судов, эксплуатирующихся на частичных режимах работы.

Список литературы

1. Современные системы по контролю работы высокооборотных двигателей морских судов / В.В. Герасиди, А.В. Лисаченко / Эксплуатация морского транспорта. 2016. № 2 (79). С. 74-78.
2. Ципленкин, Г.Е. Улучшение топливной экономичности двигателей за счет оптимизации систем наддува/ Г.Е. Ципленкин, В.И. Иовлев. // Двигателестроение.- 2014.-№3.- С. 16 – 22
3. Смирнов, А.В. Перспективный тип опор турбокомпрессоров ДВС/ А.В. Смирнов // Двигателестроение.- 2014.-№2.- С. 23 – 25.
4. Николаев, Н.И. Вибрационные характеристики современных турбокомпрессоров с радиально-осевой турбиной высокооборотных двигателей в эксплуатации / Н.И. Николаев, В.В. Герасиди, А.В. Лисаченко// Эксплуатация морского транспорта.- 2015.- №2(75).- С 56-60.
5. Оценка состояния турбокомпрессора высокооборотного двигателя в эксплуатации по параметрам вибрации / Н.И. Николаев, В.В. Герасиди, А.В. Лисаченко // Материалы пятой Всероссийской межотраслевой научно-технической конференции: «Актуальные проблемы морской энергетики». – СПб: РИО ГМТУ, 2016. С. 159-161.
6. М.Д. Генкин. Вибрации в технике. – Том 5. – М.: Машиностроение, 1981. –496 с.
7. Контроль состояния двигателя фирмы «Caterpillar» CAT 3512 грунтонасосной установки земснаряда по вибрационным параметрам / Хекерт Е.В., Николаев Н.И., Герасиди В.В. // Морские интеллектуальные технологии. №4. – СПб: РИО «НИЦ «МОРИНТЕХ», – №1., т.1 2018.
8. Анализ теплотехнических параметров на основе опыта применения переносных диагностических комплексов современных морских главных высокооборотных двигателей / А.В. Лисаченко, В.В. Герасиди // Эксплуатация морского транспорта. 2020. № 4 (97). С. 89-94.
9. ГОСТ 10448—2014 Двигатели внутреннего сгорания. Поршневые. Приемка. Методы испытаний - М.: Стандартинформ, 2015.-21 с.
10. ГОСТ 18322-78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. - М.: Стандартинформ, 2007.-12 с.
11. Р.В. Кузьмин. Техническое состояние и надежность судовых механизмов. – Л.: Судостроение, 1974. – 336 с.
12. Соловьёв, А. В. Интеллектуальная система управления классификационной деятельностью на водном транспорте // Речной транспорт (XXI век). 2017. № 84. С. 40–42.
13. Соловьёв, А. В. Концепция единого целеориентированного управления судовой энергетической установкой // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адм. гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова. 2017. Т. 9. № 5. С. 1027–1039.
14. Стецюк, А.Е. Основы технической диагностики. Теория распознавания. Учебное пособие / А.Е. Стецюк, Я.Ю. Бобровников - Хабаровск : Изд. ДВГУПС, 2012.- 69 с.
15. Зверев, Г.Я. Оценка надёжности изделия в процессе эксплуатации / Г.А. Зверев -М.: Комкнига, 2006. - 96 с.
16. Исаева, М.В. Разработка инвариантных экспериментально-теоретических моделей для контроля теплонапряженности цилиндропоршневой группы судовых дизелей по косвенным параметрам: дис. ... канд. тех. наук: 05.08.05 / Исаева Марина Васильевна. - Калининград., 2018. - 146 с.
17. Мартынов, Н.П. Основы теории надёжности и диагностики. Учебное пособие / Н.П. Мартынов и др. - СПб. : Изд. ВМИИ, 2003. - 242 с.

References

1. Gerasidi, V. V., & Lisachenko, A. V. (2016). Modern systems for monitoring the operation of high-speed marine engines. *Ekspluatatsiya Morskogo Transporta*, *2*(79), 74–78.

2. Tsiplenkin, G. E., & Iovlev, V. I. (2014). Improving engine fuel efficiency by optimizing supercharging systems. *Dvigatelistroyeniye*, *3*, 16–22.
3. Smirnov, A. V. (2014). A promising type of support for internal combustion engine turbochargers. *Dvigatelistroyeniye*, *2*, 23–25.
4. Nikolaev, N. I., Gerasidi, V. V., & Lisachenko, A. V. (2015). Vibrational characteristics of modern turbochargers with radial-axial turbines of high-speed engines in operation. *Ekspluatatsiya Morskogo Transporta*, *2*(75), 56–60.
5. Nikolaev, N. I., Gerasidi, V. V., & Lisachenko, A. V. (2016). Assessment of the condition of a high-speed engine turbocharger in operation based on vibration parameters. In **Proceedings of the 5th All-Russian Interdisciplinary Scientific and Technical Conference: "Current Problems of Marine Power Engineering"** (pp. 159–161). Saint Petersburg: RIO GMTU.
6. Genkin, M. D. (1981). *Vibrations in engineering: Vol. 5. Mashinostroenie*.
7. Hekert, E. V., Nikolaev, N. I., & Gerasidi, V. V. (2018). Monitoring the condition of the Caterpillar CAT 3512 engine of a dredger's soil pump unit based on vibration parameters. *Morskiye Intellektualnyye Tekhnologii*, *1*(1).
8. Lisachenko, A. V., & Gerasidi, V. V. (2020). Analysis of thermotechnical parameters based on experience in using portable diagnostic complexes for modern marine main high-speed engines. *Ekspluatatsiya Morskogo Transporta*, *4*(97), 89–94.
9. Russian Federation. (2015). **GOST 10448-2014. Internal combustion engines. Piston engines. Acceptance. Test methods**. Standartinform.
10. Russian Federation. (2007). **GOST 18322-78. System for maintenance and repair of equipment. Terms and definitions**. Standartinform.
11. Kuzmin, R. V. (1974). Technical condition and reliability of ship mechanisms. *Sudostroyeniye*.
12. Solovyov, A. V. (2017). Intelligent system for managing classification activities in water transport. *Rechnoy Transport (XXI Vek)*, *84*, 40–42.
13. Solovyov, A. V. (2017). The concept of unified goal-oriented control of a ship's power plant. *Vestnik Gosudarstvennogo Universiteta Morskogo i Rechnogo Flota Imeni Admirala S.O. Makarova*, *9*(5), 1027–1039. <https://doi.org/10.21821/2309-5180-2017-9-5-1027-1039>
14. Stetsyuk, A. E., & Bobrovnikov, Ya. Yu. (2012). Fundamentals of technical diagnostics. Recognition theory. Izdatelstvo DVGUPS.
15. Zverev, G. Ya. (2006). Product reliability assessment during operation. KomKniga.
16. Isaeva, M. V. (2018). Development of invariant experimental-theoretical models for monitoring the thermal stress of the cylinder-piston group of marine diesel engines using indirect parameters [Candidate dissertation, Kaliningrad State Technical University].
17. Martynov, N. P., et al. (2003). Fundamentals of reliability and diagnostics theory. Izdatelstvo VMiI.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Лисаченко Алексей Витальевич, кандидат технических наук, преподаватель кафедры Эксплуатация судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, пр-т Ленина, 93, e-mail: alexx.liss@yandex.ru

Alexey V. Lisachenko, Ph.D. (Eng), the Lecturer of department operation of marine mechanical installations, Admiral Ushakov State Maritime University Russia, Novorossiysk, Lenin's avenue, 93, e-mail: alexx.liss@yandex.ru

Николаев Николай Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Эксплуатация судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, пр-т Ленина, 93

Nikolay I. Nikolaev, the professor, Dr.Sci.Tech., the professor of department operation of marine mechanical installations, Admiral Ushakov State Maritime University Russia, Novorossisk, Lenin's avenue, 93

Герасиди Виктор Васильевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Эксплуатация судовых механических установок, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, пр-т Ленина, 93

Viktor V. Gerasidi, Ph.D. (Eng), the assistant professor of department operation of marine mechanical installations, Admiral Ushakov State Maritime University Russia, Novorossiysk, Lenin's avenue, 93, e-mail: gerasidi@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 04.08.2025; опубликована онлайн 20.09.2025.
Received 04.08.2025; published online 20.09.2025.

9УДК 621.65.03

DOI: 10.37890/jwt.vi84.636

Валидация численной модели лопастной системы осевого насоса ОД-2

Е.С. Шишов

ORCID: 0009-0009-3855-7887

С.Н. Зеленов

ORCID: 0009-0007-6877-1089

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

Аннотация. Была разработана численная модель, при помощи которой произведены расчеты основных параметров работы осевого насоса в нестационарной постановке с использованием сегментной геометрии, состоящей из одной лопатки рабочего колеса и спрямляющего аппарата, и моделью турбулентности k-ε. Расчеты выполнены для всего диапазона подач напорной характеристики осевого насоса ОД-2. Полученные расчетные характеристики (напор, КПД) сравниваются с данными физических испытаний насоса. Получены качественно схожие расчетные аналитические зависимости напорной характеристики и значений КПД с кривыми реального насоса, но количественно наблюдается рост расхождения характеристик с увеличением подачи. Так, расхождение расчетного напора с действительным составляет 15-30% при коэффициенте подачи меньше $K_Q = 0,4$, что является приемлемым результатом для инженерных задач. При коэффициенте подачи выше, наблюдается значительное увеличение расхождения напора. Анализ распределения статического давления вблизи лопаток рабочего колеса, полученного при помощи численной модели, показал наличие физически недостоверных зон разряжения, что указывает на условия интенсивной кавитации в реальности. Это делает ограниченно применимыми подобные численные модели, не учитывающие влияние кавитации, для получения характеристик насосов водометных движителей. Для уменьшения расхождения результатов численного моделирования необходима разработка модели с учетом кавитации, а также использование больших вычислительных ресурсов.

Ключевые слова: осевой насос, водометный движитель, вычислительная гидродинамика, валидация

Validation of the numerical model of the vane system of the axial-flow pump OD-2

Egor S. Shishov

ORCID: 0009-0009-3855-7887

Sergey N. Zelenov

ORCID: 0009-0007-6877-1089

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

Abstract. A numerical model was developed, which was used to calculate the main operating parameters of an axial-flow pump in a non-stationary setting using segmented geometry consisting of one rotor blade and stator and a k-ε turbulence model. Calculations were performed for the entire range of flow-rates of the head characteristic of the OD-2 axial-flow pump. The obtained calculated characteristics (head, efficiency) are compared with the data of physical tests of the pump. Qualitatively similar calculated analytical dependencies of the head characteristic and efficiency values with the curves of a real pump were obtained, but quantitatively, an increase in the divergence between the characteristics with an increase in the flow-rate is observed. Thus, the divergence between the calculated and actual head is 15-30% at a feed rate of less than $K_Q = 0.4$, which is an acceptable result

for engineering goals. At a flow-rate above, a significant increase in the divergence between the head is observed. Analysis of the static pressure distribution near the rotor blades obtained using a numerical model showed the presence of physically unreliable rarefaction zones, which indicates conditions of intense cavitation in reality. This makes such numerical models that do not take into account the effect of cavitation of limited applicability for obtaining the characteristics of waterjet pumps. To reduce the divergence between the results of numerical modeling, it is necessary to develop a model taking into account cavitation, as well as to use more computing resources.

Keywords: axial-flow pump, waterjet propulsor, computational fluid dynamics, validation

Введение

Осевые насосы являются неотъемлемой частью водометных движителей. Достижение высокой эффективности работы водометных движителей представляет собой сложную инженерную задачу. Традиционные подходы к проектированию и анализу, основанные на масштабных физических экспериментах, сопряжены с высокими затратами времени и ресурсов, как показывают результаты работ [1] и [2]. Кроме того, они не всегда способны предоставить картину протекающих гидродинамических процессов: распределения давления и скорости потока в различных сечениях проточной части, значений мощности, потребляемой самой лопастной системой, и ее гидравлического КПД.

В этом контексте CFD-моделирование (Computational Fluid Dynamics – вычислительная гидродинамика) стало инструментом, позволяющим изучать сложные гидродинамические явления внутри насоса. Такое моделирование позволяет оценить влияние конструктивных решений и режимов работы на общую эффективность насоса. Получаемые при помощи CFD данные о основных эксплуатационных характеристиках, таких как напор, подача, крутящий момент/потребляемая мощность и КПД, имеют практическую ценность. В частности, они важны при проектировании и оптимизации параметров насосов, используемых в составе водометных движителей (таких как форма и угол установки лопастей рабочего колеса и спрямляющего аппарата, создаваемый напор и подача), где достижение высокой гидродинамической эффективности является ключевым фактором.

Однако, большой проблемой, определяющей практическую применимость результатов численного моделирования, является определение степени соответствия CFD-расчетов реальным физическим процессам. Достоверность получаемых результатов напрямую влияет на возможность их использования в инженерной практике. В данной работе валидация производится путем прямого сравнения результатов CFD-моделирования (рассчитываемых параметров: напора, подачи, крутящего момента, мощности и КПД) с данными натурных испытаний реального насоса ОД-2.

Поэтому, целью данной работы является проверка возможностей и ограничений численного моделирования для расчета основных характеристик осевых насосов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- построение трехмерной модели сегмента лопастной системы;
- настройка CFD-модели;
- определение характеристик в диапазоне подач, представленных в [3, 4];
- сравнение расчетных данных с экспериментальными и количественная оценка расхождений;
- анализ причин возникновения расхождений и предложение решений по их уменьшению.

Методы

Назначение водометного движителя – это создание реактивной тяги P_e , которая обеспечивает поступательное движение судна за счет ускорения массы воды, проходящей через движитель. Эта тяга P_e определяется по формуле (1), без учета ориентации оси струи по отношению к направлению движения судна:

$$P_e = \rho Q(u - v(1 - \omega)) \cdot (1 - t), \quad (1)$$

где ρ – плотность перекачиваемой жидкости через движитель, кг/м^3 ; Q – объемный расход жидкости через движитель, $\text{м}^3/\text{с}$; u – скорость струи на выходе из сопла м/с ; v – скорость хода судна м/с ; ω – коэффициент попутного потока; t – коэффициент засасывания.

Из формулы (1) следует, что создаваемая тяга напрямую зависит от: скорости судна v , скорости реактивной струи u , расхода жидкости Q . Имеются другие факторы, влияющие в меньшей степени, на ее величину: плотность жидкости (воды) ρ , зависящая от солености; коэффициенты попутного потока ω и засасывания t зависящие от формы обводов корпуса, геометрии водозаборника и водовода. Поэтому, указанные параметры принимаются постоянными при исследовании работы лопастной системы.

Скорость струи на выходе из сопла определяется напором насоса H по формуле (2):

$$u = \sqrt{(2gH + v^2(1 - \omega)^2 \cdot (1 - \xi_\Sigma))}, \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; ξ_Σ – суммарный коэффициент гидравлического сопротивления тракта водометного движителя.

Уравнение (2) показывает, что повышение напора насоса H увеличивает скорость струи u , что ведет к росту тяги по формуле (1).

Для эффективной работы движителя насос должен обеспечивать напор при необходимом расходе жидкости через движитель, т.е. необходимо согласовать напорную характеристику с характеристикой сети в гидравлической системе. Напорная характеристика насоса $H_n(Q)$ отражает способность обеспечить необходимый перепад давлений для преодоления сопротивления системы при заданном расходе Q . Характеристика сети $H_c(Q)$ описывает гидравлические потери в тракте водометного движителя. Рабочая точка системы определяется пересечением этих кривых (рис. 1). Здесь насос развивает напор H_p , необходимый для поддержания расхода Q_p , обеспечивающего расчетные параметры тяги (формула 1).

Следует отметить, что на рис. 1 абстрактно изображены: напорная характеристика насоса при одной постоянной частоте вращения и характеристика сети при одной постоянной скорости хода судна. При изменении частоты вращения рабочего колеса происходит изменение напорной характеристики, её некоторое одновременное смещение по оси абсцисс и ординат. В тоже время характеристика сети при изменении скорости хода преимущественно смещается вдоль оси абсцисс.

Лопастная система (рабочее колесо и спрямляющий аппарат) насоса – ключевой элемент, определяющий его гидравлический КПД и напорную характеристику. Её геометрия напрямую влияет на эффективность работы водометного движителя. Для получения характеристик насоса при заданной геометрии лопастей возможно применять численное моделирование, помимо классических методов расчета. В качестве прототипа была выбрана лопастная система осевого насоса ОД-2, поскольку обладает наибольшим гидравлическим КПД (89%) из ряда других лопастных систем, таких как: ОД-1, ОД-10, ОД-18, разработанных в ЛПИ (СПбПУ), представленных в литературе по проектированию водометных движителей [3, 4, 5].

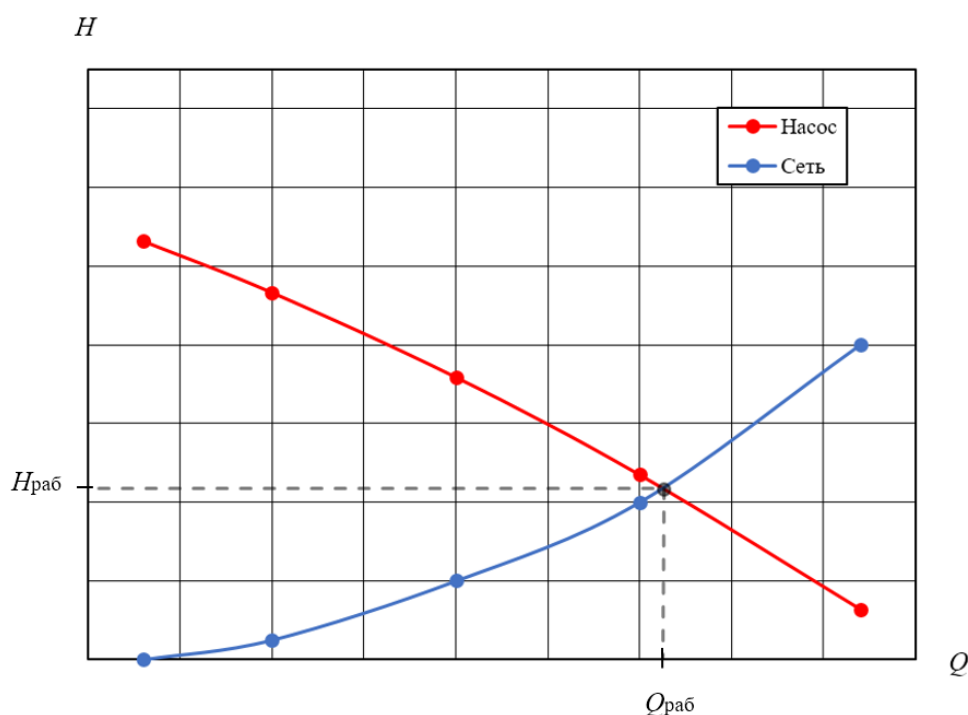


Рис. 1. Совмещение характеристики насоса и сети тракта водометного движителя

Геометрия лопастной системы насоса ОД-2 (рабочее колесо и спрямляющий аппарат) представлены в источниках [3] и [4], как в безразмерном, так и в размерном виде соответственно. Рабочее колесо (рис. 2) имеет число лопастей $z_p = 4$, а число спрямляющих лопаток $z_c = 3$. Отношение диаметра ступицы к диаметру рабочего колеса составляет $d_{ст}/d_{рк} = 0,25$. Геометрические характеристики рабочего колеса и спрямляющего аппарата в безразмерном виде представлены в таблице 1.

Таблица 1

Геометрические характеристики лопастной системы ОД-2

r/R	H/D	b/D	e/b
Рабочее колесо			
0.25	1.19	0.273	0.127
0.3	1.16	0.27	0.124
0.4	1.09	0.264	0.116
0.5	1	0.259	0.105
0.6	0.9	0.253	0.09
0.7	0.81	0.247	0.078
0.8	0.75	0.241	0.063
0.9	0.74	0.236	0.048
1	0.86	0.23	0.036
Спрямляющий аппарат			
0.25	2.5	0.45	0.0516
0.3	3.5	0.45	0.0524
0.4	6	0.45	0.05355

r/R	H/D	b/D	e/b
0.5	9.2	0.45	0.0542
0.6	13	0.45	0.05455
0.7	17.7	0.45	0.0547
0.8	22.3	0.45	0.0548
0.9	26.4	0.45	0.0549
1	30	0.45	0.0549

где r/R – отношение радиуса цилиндрического сечения профиля к радиусу рабочего колеса рабочего колеса. H/D – отношение шага рабочего колеса к его диаметру, b/D – отношение длины хорды лопасти к диаметру рабочего колеса, e/b – отношение максимальной толщины лопасти к длине ее хорды.

На основе безразмерных данных, была построена CAD-модель лопастной системы для диаметра рабочего колеса $D = 350$ мм (рис. 2).

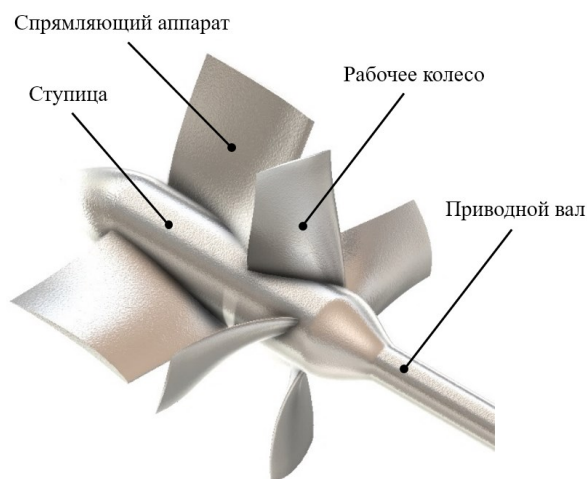


Рис. 2. Лопастная система ОД-2

В целях сокращения требуемых вычислительных ресурсов без существенной потери физической адекватности модели, был применен подход сегментного моделирования. В этом случае в расчетную область включается только один сегмент, содержащий по одной лопасти рабочего колеса и спрямляющего аппарата (рис. 3). Обоснованием такого допущения является то, что рабочее колесо представляет собой периодическую структуру, где характеристики потока в различных сегментах повторяются.

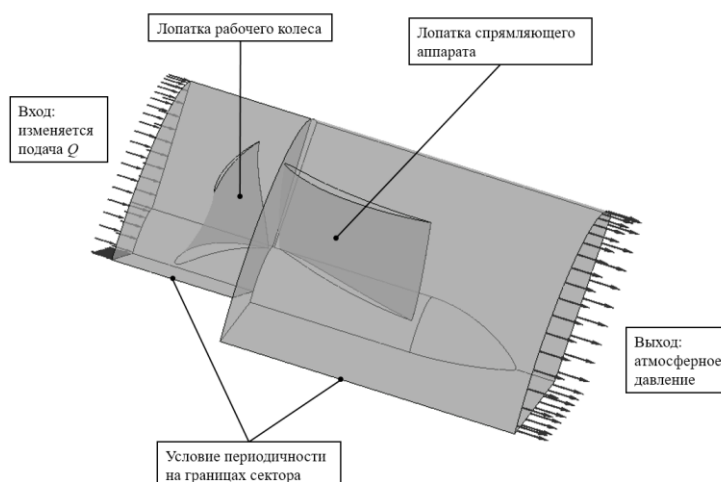


Рис. 3. Сегмент расчетной области

Для дискретизации расчетной области была построена неструктурированная тетраэдральная сетка с использованием призматических слоев вблизи стенок для разрешения пограничного слоя. Особое внимание уделяется качеству сетки (дроблению ячеек) в наиболее значимой для условия схождения расчета, области поверхности лопаток (рис. 4). Для рабочего колеса и спрямляющего аппарата используются призматические слои, количество которых равняется десяти, с минимальной длиной элемента до 0,1 мм, значение y^+ (безразмерное расстояние от центра пристеночной ячейки до стенки) варьируется от 150 до 360 по поверхности лопаток. Для стенок ступицы и стенки трубы (корпуса насоса) количество призматических слоев равно пяти, с максимальной длиной элемента до 15 мм. Общее число расчетных ячеек составляет 1,12 млн.

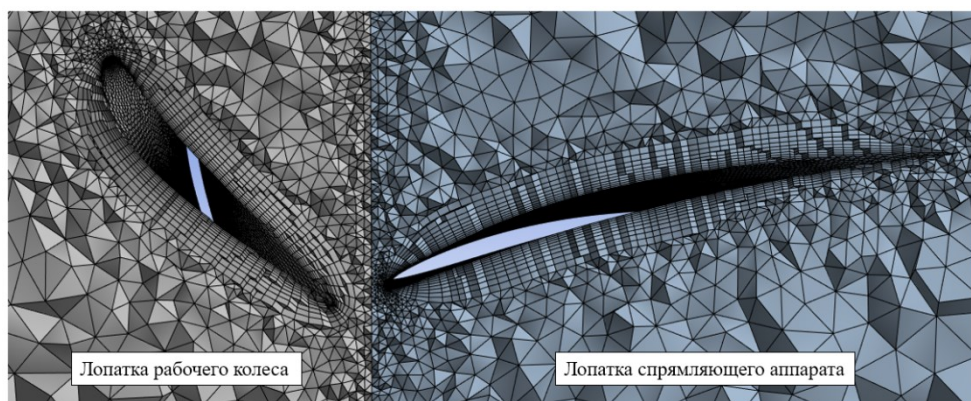


Рис. 4. Расчетная сетка в области корневого сечения лопаток

Численное моделирование гидродинамики потока в насосе производится с помощью метода конечных элементов, решая систему уравнений О. Рейнольдса (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), представляющие собой усредненные по времени уравнения движения вязкой жидкости (уравнения Навье-Стокса). Используется модель турбулентности $k-\epsilon$ с пристеночной функцией [6, 7, 8].

Для расчетной области были заданы следующие граничные условия:

- для *входа* задано условие «Mass-Flow Rate». Значение подачи изменялось от 329 кг/с до 887 кг/с, что соответствует крайним точкам паспортной напорной характеристики насоса ОД-2 при угле поворота лопастей рабочего колеса $\varphi = 0^\circ$ [3, 4]. Интенсивность турбулентности на входе принята равным 5%.
- для *выхода* задано условие «Average Static Pressure» принимается равным 0 Па, что соответствует атмосферному давлению на выходе.
- для *стенок* всех поверхностей задано условие «No Slip Wall». Для поверхности лопаток и ступицы задается шероховатость «Sand Grain Roughness» равной 50 мкм, для всех остальных стенок шероховатость принимается равной 100 мкм. Стенки рабочего колеса и ступицы помечены как вращающиеся (Rotating) с частотой вращения 2000 об/мин. Для стенки корпуса насоса задается условие «Counter Rotating Wall». Стенки спрямляющего аппарата помечены как «Stationary» (неподвижные).
- *периодические границы* заданы на гранях угловых сегментов рабочего колеса и спрямляющего аппарата задан интерфейс с условием «Rotational Periodicity» относительно оси вращения рабочего колеса.
- *интерфейс на границе раздела* между вращающейся (рабочее колесо) и неподвижной (спрямляющий аппарат) областями используется с условием «Stage (Mixing-Plane)». Используется «Specified Pitch Angles» для сектора рабочего колеса равным 90° , а для сектора спрямляющего аппарата 120° .

Постановка задачи – нестационарная, с использованием метода «Transient Blade Row». Данный подход учитывает нестационарное взаимодействие между вращающимися лопатками рабочего колеса и неподвижными лопатками спрямляющего аппарата. Период вращения задан равным $T = 0,03$ с. Временной шаг $t = 0,005$ с. Такое значение обеспечивает разрешение 60° углового перемещения рабочего колеса за один шаг.

Контроль сходимости нестационарного расчета осуществляется по нескольким ключевым критериям: Среднеквадратичные невязки (RMS Residuals) уравнений неразрывности и моментов количества движения принимают значения между уровнями равным $1e-4$ и $1e-5$ (рис. 5). Дисбалансы (Imbalance) принимают значения менее 0,5% (рис. 6). Ключевым критерием выхода на установившийся режим являлась стабилизация (отсутствие значимых периодических колебаний величин) следующих величин: массовая подача Q , крутящий момент на лопатке рабочего колеса M , значение напора H .

Для валидации, получаемых результатов, производится сравнение с паспортными данными лопастной системы ОД-2 [4], оценивается отклонение основных параметров работы в безразмерном виде, таких как: коэффициент напора K_H и КПД η в зависимости коэффициента подачи K_Q , полученных в результате численного моделирования.

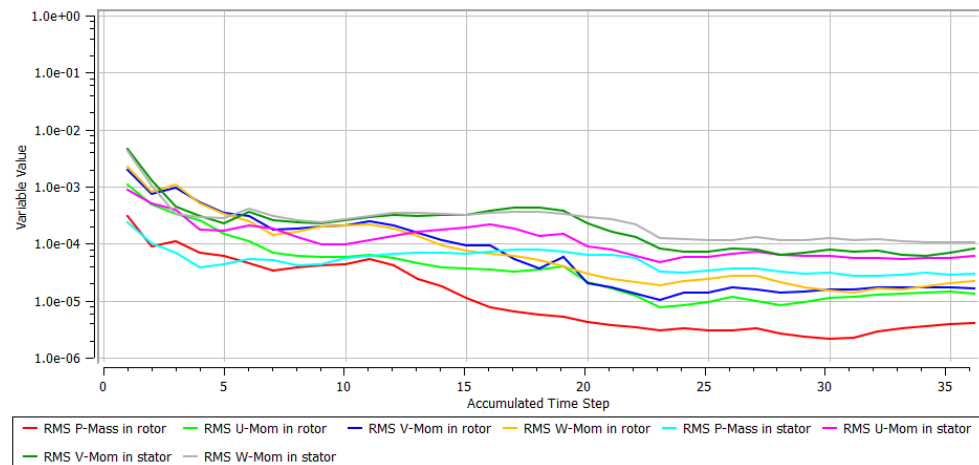


Рис. 5. График сходимости среднеквадратичных невязок

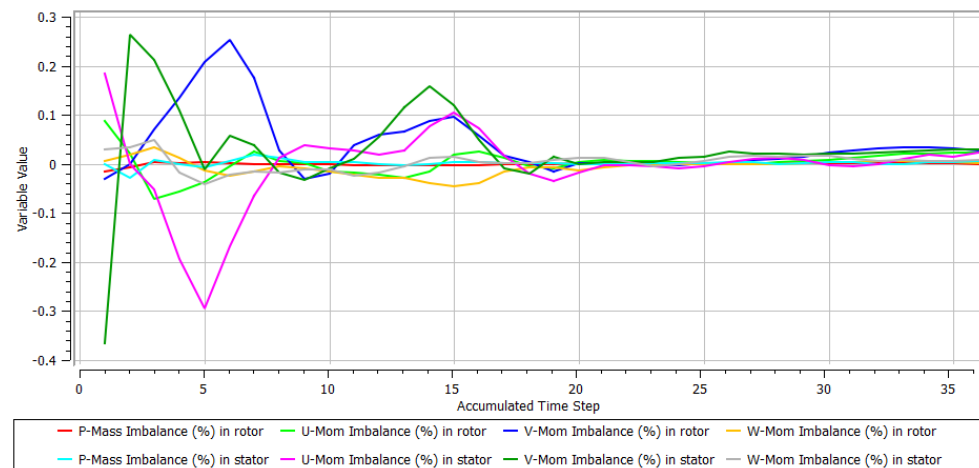


Рис. 6. График сходимости дисбалансов

Результаты

В работе производится сравнение напорной характеристики лопастной системы ОД-2, и её КПД, полученных методом CFD-моделирования, с данными представленными [3, 4]. Зависимость коэффициента напора K_H от коэффициента подачи K_Q представлены на рис. 7 и на рис. 8 представлены зависимости гидравлического КПД η от коэффициента подачи K_Q .

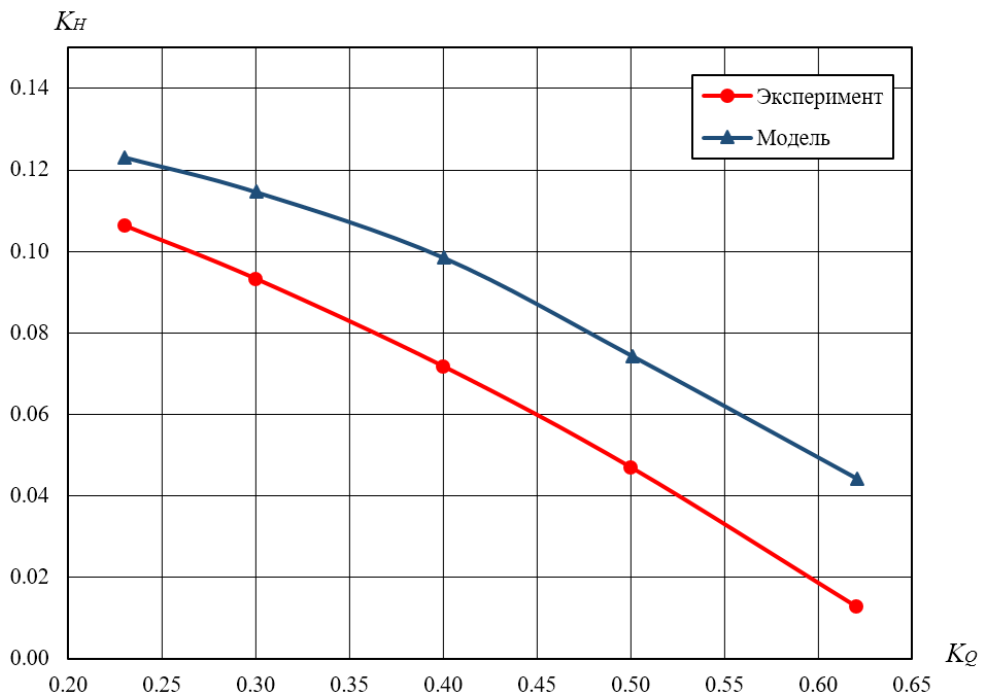


Рис. 7. Напорная характеристика лопастной системы

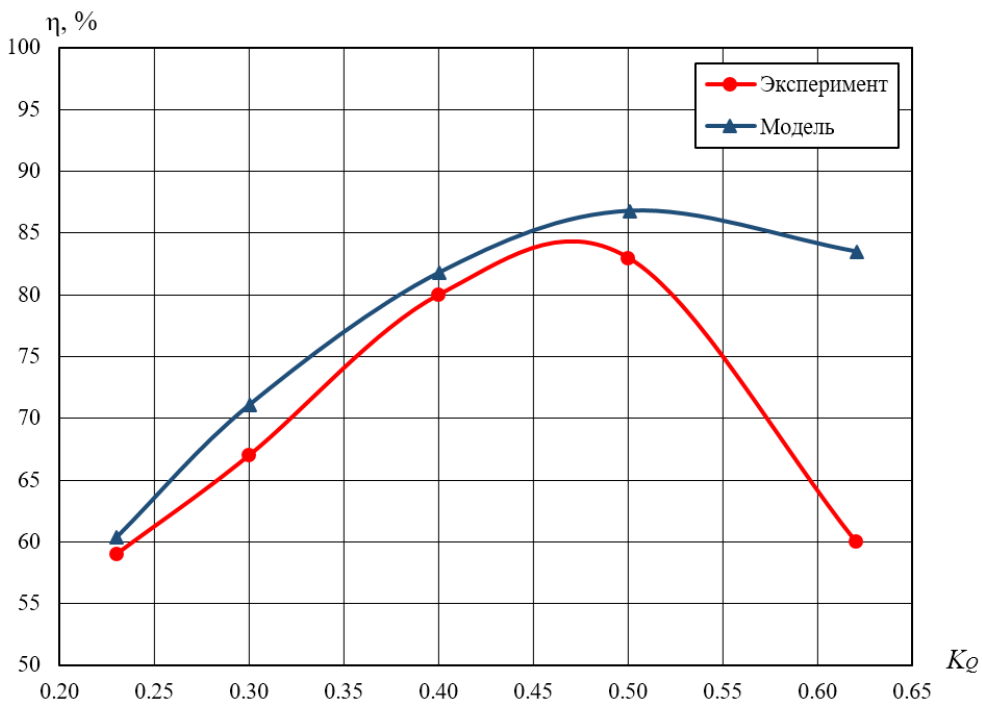


Рис. 8. Зависимость КПД от коэффициента подачи

Результаты CFD-моделирования качественно воспроизводят форму экспериментальных кривых. Расчетный напор при коэффициенте подачи меньше $K_Q = 0,4$, удовлетворительно согласуется с реальными значениями, его расхождение составляет 5-30%. При коэффициенте подачи насоса свыше 0,4, расхождение возрастает, при максимальном значении коэффициента подачи, расчетный напор превышает действительный вплоть до 110% (т.е. расчетное значение более чем в двое выше реального). Это указывает на то, что разработанная и используемая численная модель (RANS с k-ε моделью турбулентности, отсутствие учета кавитации, малая дискретизация сетки) не полностью отражает гидродинамические процессы работы лопастной системы.

Для выявления причин установленных расхождений в характеристиках был проведен анализ распределения давления на лопатках (рис. 9).

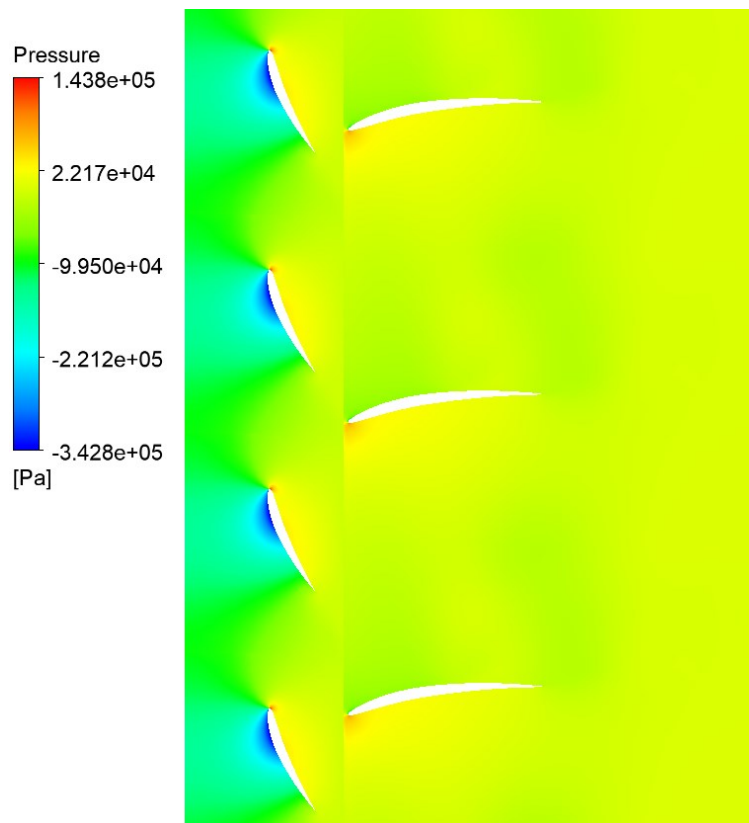


Рис. 9. Распределение статического давления внутри лопастной системы

На рис. 8 изображено распределение статического давления при $K_Q = 0,4$ на относительном радиусе цилиндрического сечения равном 0,5. Рассматривая распределение статического давления около лопаток рабочего колеса, видно, что на всасывающей поверхности значения *меньше* атмосферного на 340 кПа что говорит о недостоверности получаемой физической картины. Очевидно, что существование таких значений – прямое следствие отсутствия учета модели кавитации.

Значительный рост расхождений значений напора и КПД с реальными при высоких значениях коэффициента подачи связан с ограничениями модели, обусловленные располагаемыми вычислительными ресурсами. Данный рост объясняется отсутствием учета образования кавитации и, как следствие,

недостоверность получаемых значений статического давления, из-за которого и происходит завышение расчетных значений напора и КПД. Моделирование кавитации требует больших для данного исследования вычислительных ресурсов. В разработанной модели поток искусственно поддерживается при физически невозможных давлениях, сказываясь на получаемый результат, и это – определяющая причина. Использование сегментной модели, основанной на одной лопатке рабочего колеса и спрямляющего аппарата (вместо полной геометрии) была выбрана для сокращения вычислительных затрат. Такое допущение также могло вносить некоторые неточности протекания потока, что повлияло на расхождение результатов. Ограничение RANS-подхода для решения данной задачи, использование стандартной k-ε модели турбулентности как менее затратной к вычислительным ресурсам. Существуют более совершенные и сложные модели турбулентности, в сравнении с используемой, что также является одним из факторов, влияющих на результат. Влияние заданных граничных условий и погрешности снятия результатов экспериментальных испытаний реального насоса – менее значимые потенциальные факторы.

Обсуждение

Настоящее исследование продемонстрировало как возможности, так и текущие ограничения применения нестационарного CFD-моделирования для получения гидродинамических характеристик осевых лопастных систем. Ключевым результатом является значительное расхождение между расчетным и реальным напором при значениях коэффициента подачи свыше $K_Q = 0,4$ (до 110% по напору), в то время как при меньших коэффициентах подачи расхождение напора находится на уровне 5-30%. Такие расхождения, могут считаться приемлемыми для инженерной практики при проектировании осевых насосов, включая насосы водометных движителей. При малых значениях коэффициентов подачи разработанная численная модель позволяет прогнозировать изменения основных рабочих характеристик и предоставляет информацию о распределении давления, структуре потока в проточной части насоса. Основной причиной роста расхождения напора при высоких значениях коэффициента подачи является неспособность разработанной модели учесть явление кавитации, что привело к получению физически невозможных значений статического давления и, как следствие, к сильному завышению напора и КПД. Этот результат имеет важное практическое следствие: CFD-модели без учета кавитации непригодны для прогнозирования поведения насоса (особенно водометного движителя, чувствительного к кавитации) на режимах, где возможно падение давления ниже давления насыщенных паров жидкости.

Указанные ограничения модели напрямую связаны с принятыми решениями, определяемые располагаемыми вычислительными ресурсами:

- неучет кавитации – это ключевое ограничение, обусловившее расхождение результатов с увеличением подачи. Реализация её влияния в рамках нестационарного расчета требует на порядки больших вычислительных ресурсов (памяти, процессорного времени), чем были доступны.
- использование сегментной модели с одной лопаткой рабочего колеса и спрямляющего аппарата дало значительную экономию ресурсов и позволило провести расчеты на располагаемых вычислительных мощностях. Этот подход мог внести дополнительное, хотя и вторичное по сравнению с кавитацией, влияние на получаемые результаты.
- выбор стандартной k-ε модели был компромиссом между точностью и вычислительной эффективностью. Более сложные модели (T-SST, SAS, LES, DES) потенциально могли бы лучше предсказать развитие зон с

низким давлением и связанные эффекты, но их применение было бы требовало значительно больших вычислительных ресурсов, особенно в сочетании с учетом кавитации.

Приоритетом для будущих исследований, является развитие численной модели за счет учета влияния образования кавитации. Это критически необходимо для расширения возможностей CFD-моделирования во всем диапазоне работы насоса, особенно для водометных движителей, где также влияние кавитации необходимо минимизировать. Для реализации кавитационных моделей необходимо обеспечить значительные вычислительные ресурсы [9, 10].

Несмотря на выявленное значительное ограничение, связанное с ресурсными ограничениями, настоящее исследование подтвердило, что тщательно настроенное численное моделирование является мощным инструментом для анализа и оптимизации гидродинамики осевых насосов на их основных рабочих режимах. Полученные данные и методика представляют практическую ценность для расчета основных параметров насосов водометных движителей. Преодоление ключевого ограничения путем включения кавитационных моделей в будущих работах позволит выйти на путь к созданию более совершенного инструмента для исследования влияния изменения конструкции лопастной системы на ее эффективность работы.

Заключение

В рамках данного исследования было выполнено комплексное численное моделирование гидродинамики осевого насоса ОД-2 с использованием нестационарного подхода и проведена валидация расчетных данных с реальными. Полученная модель качественно передает зависимости напорной характеристики и значений КПД в сравнении с реальными данными работы лопастной системы. Обеспечивает приемлемую для инженерного проектирования точность, получаемое расхождение с экспериментом по напору составляют 15-30% при коэффициентах подачи менее 0,4. Модель применима для проведения качественного анализа гидродинамики потока, изучения влияния геометрии лопастей рабочего колеса и направляющего аппарата на эффективность работы лопастной системы. Существует количественное расхождение результатов расчетов с реальными данными работы, так с увеличением коэффициента подачи наблюдается рост расхождения напора 110%. Основной причиной является физическая недостоверность модели, связанная с отсутствием учета кавитации. В результате анализа расчетов было выявлено что давление на всасывающей стороне лопаток *меньше* атмосферного на 340 кПа (невозможное значение), что неизбежно вызвало бы интенсивную кавитацию в реальном насосе, резко снижающую его рабочие характеристики. Данное ограничение напрямую обусловлено недостатком вычислительных ресурсов, необходимых для реализации ресурсоемких кавитационных моделей.

Следовательно, использование подобных численных моделей (без учёта кавитации) для прогнозирования характеристик насосов, особенно чувствительных к кавитации водометных движителей недопустимо и может привести к значительным ошибкам проектирования. Для преодоления ключевого ограничения и расширения прогностических возможностей вычислительной гидродинамики, необходимы дальнейшие исследования с обязательным включением кавитационных моделей. Решение перечисленных выше проблем требует использования более производительных вычислительных мощностей.

Работа подтверждает, что численное моделирование в совокупности с подтверждением результатов расчетов на эмпирических данных является мощным инструментом, способным качественно отразить аспекты работы гидродинамических устройств, который способен сопровождать основные этапы проектирования осевых насосов и водометных движителей. Методика исследования и полученные данные

вносят вклад в развитие средств вычислительной гидродинамики для расчета и проектирования лопастных систем.

Список литературы

1. Шишов Е.С. Результаты испытаний модели водометного движителя грузового катера // Научные проблемы водного транспорта. 2025. №82 (1). С. 124-134. URL: <http://journal.vsuwt.ru/index.php/jwt/article/view/571/461>. (дата обращения 22.06.2025).
2. Шишов Е.С. Экспериментальный стенд для исследования масштабных моделей водометных движителей / Е.С. Шишов, С.Н. Зеленев // Транспортные системы. 2024. №2(32). С. 18-23. URL: <https://transport-systems.ru/index.php/arkhiv/49-2024/51-2-2024-g/173-2024-02-3>. (дата обращения 22.06.2025).
3. Анчиков С.Л. Водометные движители. Вопросы проектирования. СПб.: «Реноме» 2021. 252 С.
4. Папир А.Н. Водометные движители малых судов. Л.: Судостроение, 1970. 256 С.
5. Куликов, С.В. Водометные движители (теория и расчет) / С.В. Куликов, М.Ф. Храмкин. Л.: Судостроение, 1980. – 312 с.
6. Жидков А.В., Любимов А.К. Вычислительная гидродинамика. Математические модели жидкостей и газов: учебно-методическое пособие. Н.Новгород: ННГУ им. Н.И. Лобачевского. 2021. 42 С.
7. Гарбарук А. В. Современные подходы к моделированию турбулентности: учеб. пособие / А. В. Гарбарук [и др.]. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2016. 234 С.
8. Белов И.А. Моделирование турбулентных течений: Учебное пособие / И.А. Белов, С.А. Исаев, СПб: Балт. гос. техн. ун-т. 2001. 108 С.
9. Ivanov E.A. Technique for axial pump characteristics predicting in CFD package OpenFOAM. AIP Conference Proceedings. 2019. DOI:10.1063/1.5122113 URL: https://www.researchgate.net/publication/335478425_Technique_for_axial_pump_characteristics_predicting_in_CFD_package_OpenFOAM. (дата обращения 22.06.2025).
10. Козелков А.С. Исследование потенциала суперкомпьютеров для масштабируемого численного моделирования задач гидродинамики в промышленных приложениях / А.С. Козелков, В.В. Курулин, С.В. Лашкин, Р.М. Шагалиев, А.В. Ялозо // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2016. Т. 56. № 8. С. 1524-1535.

References

1. Shishov E.S. Results of testing the model of the water-jet propulsor of a cargo boat / Shishov E.S., Zelenov S.N. // Scientific problems of water transport. 2025. №82 (1). P. 124-134. (in Russ). <http://journal.vsuwt.ru/index.php/jwt/article/view/571/461>.
2. Shishov E.S. Experimental test bench for the research of scale models of waterjets / Shishov E.S., Zelenov S.N. // Scientific problems of water transport. 2024. №2(32). P. 18-23. (in Russ). <https://transport-systems.ru/index.php/arkhiv/49-2024/51-2-2024-g/173-2024-02-3>.
3. Anchikov S.L. Waterjet propulsors. Design issues. St. Petersburg: «Renome». 2021. 252 P. (in Russ).
4. Papir A.N. Waterjet propulsion of small vessels. Leningrad: «Sudostroenie». 1970. 256 P. (in Russ).
5. Kulikov, S.V. Waterjets (theory and calculation) / S.V. Kulikov, M.F. Khramkin. Leningrad: «Sudostroenie». 1980. 312 P. (in Russ).
6. Zhidkov A.V., Lyubimov A.K. Computational fluid dynamics. Mathematical models of liquids and gases: a tutorial. N. Novgorod: Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod. 2021. 42 P. (in Russ).
7. Garbaruk A.V. Modern approaches to turbulence modeling: textbook. manual / A.V. Garbaruk [et al.]. St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic Institute. University. 2016. 234 P. (in Russ).
8. Belov I.A. Modeling of turbulent flows: A textbook / I.A. Belov, S.A. Isaev, St. Petersburg: Baltic State Technical University. Univ. 2001. 108 P. (in Russ).
9. Ivanov E.A. Technique for axial pump characteristics predicting in CFD package OpenFOAM. AIP Conference Proceedings. 2019. https://www.researchgate.net/publication/335478425_Technique_for_axial_pump_characteristics_predicting_in_CFD_package_OpenFOAM.

10. Kozelkov A.S. Investigation of the potential of supercomputers for scalable numerical modeling of hydrodynamic problems in industrial applications / A.S. Kozelkov, V.V. Kurulin, S.V. Lashkin, R.M. Shagaliev, A.V. Yaloso // Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2016. Vol. 56. № 8. P. 1524-1535.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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,
24, email: egor370mv@gmail.com

Egor S. Shishov, postgraduate student, Nizhny
Novgorod State Technical University n.a. R.E.
Alekseev (NSTU n.a. R.E. Alekseev), Minina,
24, Nizhny Novgorod, 603155, Russian
Federation, e-mail: egor370mv@gmail.com

Зеленов Сергей Николаевич, к.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, email:
zelenov.52@yandex.ru

Sergey N. Zelenov, Ph.D. (eng), Associate
Professor of the Power Plants and Heat
Engines, Nizhny Novgorod State Technical
University n.a. R.E. Alekseev (NSTU n.a. R.E.
Alekseev), Minina, 24, Nizhny Novgorod,
603155, Russian Federation, e-mail:
zelenov.52@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 08.07.2025; опубликована онлайн 20.09.2025.
Received 08.07.2025; published online 20.09.2025.

ЭКОНОМИКА, ЛОГИСТИКА И МЕНЕДЖМЕНТ НА ТРАНСПОРТЕ

ECONOMICS, LOGISTICS AND TRANSPORT MANAGEMENT

УДК 65.011.4

DOI: 10.37890/jwt.vi84.620

Научно-методические подходы к оценке влияния инновационных цифровых технологий и услуг на трансформацию цепей поставок продукции нефтехимических предприятий

Д.Д. Бухалкин

ORCID: 0009-0005-9661-764X

В.Н. Костров

ORCID: 0000-0002-8703-6713

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

Аннотация. Исследование посвящено анализу научно-методических подходов к оценке влияния инновационных цифровых технологий и услуг в трансформации цепей поставок продукции нефтехимических предприятий. Рассматриваются существующие методы оценки эффективности практического использования инновационных цифровых технологий и услуг в управлении цепями поставок, их преимущества и ограничения, предлагаются наиболее эффективные сочетания методов оценки. На основе системного анализа научных публикаций, отраслевых отчетов и реализованных проектов предложена шкала и интегральный критерий оценки, по которым оценены девять ключевых цифровых технологий и услуг, которые оказывают значительное влияние на трансформацию бизнес-процессов, связанных с управлением цепями поставок. Определены ключевые эффекты, возникающие в результате внедрения каждой из цифровых технологий. Выявлено, что инновационные цифровые технологии и услуги сильно взаимосвязаны и наибольшие эффекты достигаются при комплексном внедрении цифровых технологий и услуг в бизнес-процессы предприятий.

Ключевые слова: цифровизация логистики, цепи поставок, интернет вещей, IoT, цифровые двойники, логистика как услуга, оценка эффективности, инновации в управлении цепями поставок.

Scientific and methodological approaches to assessing the impact of innovative digital technologies and services on the transformation of petrochemical enterprises' supply chains

Danila D. Bukhalkin

ORCID: 0009-0005-9661-764X

Vladimir N. Kostrov

ORCID: 0000-0002-8703-6713

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. This study is devoted to the analysis of scientific and methodological approaches to assessing the impact of innovative digital technologies and services on the transformation of supply chains in petrochemical enterprises. The paper reviews existing methods for

evaluating the effectiveness of the practical application of innovative digital technologies and services in supply chain management, outlining their advantages and limitations, and identifies the most effective combinations of assessment methods. Based on a systematic analysis of academic literature, industry reports, and implemented projects, the study proposes an evaluation scale and an integrated assessment criterion, which are used to assess nine key digital technologies and services that exert a significant influence on the transformation of supply chain-related business processes. The key effects resulting from the implementation of each technology are identified. The findings reveal a high degree of interdependence among digital technologies and services, with the most substantial effects achieved through their comprehensive integration into enterprise business processes.

Keywords: logistics digitalization, supply chains, Internet of Things, IoT, digital twins, Logistics-as-a-Service (LaaS), performance evaluation, innovations in supply chain management.

Введение

Нефтехимическая промышленность является важной частью глобальной экономики, обеспечивая выпуск полимеров, синтетических материалов, удобрений и сырья для смежных отраслей. В последнее десятилетие, предприятия нефтехимического комплекса Российской Федерации всё чаще сталкиваются с вызовами, затрагивающими их цепи поставок. Нарушение традиционных маршрутов поставок, отсутствие доступа к традиционным добавкам и единицам оборудования, конкуренция со стороны зарубежных производителей, а также высокие требования клиентов по срокам поставок и качеству продукции вынуждают компании искать новые подходы в управлении цепями поставок и выстраиванию бизнес-процессов. Адаптируясь к этим вызовам предприятия нефтехимического комплекса трансформируют свои процессы, внедряя передовые цифровые и организационные решения.

На передний план выходят инновационные цифровые технологии и услуги, способные обеспечить не только оперативное реагирование на внешние сбои, но и превентивное управление рисками, адаптивность и устойчивость цепей поставок. Интернет вещей (IoT), цифровые двойники, предиктивная аналитика, цифровые платформы управления мультимодальной логистикой и другие цифровые технологии и услуги позволяют не только повысить эффективность бизнес процессов, но и трансформировать саму архитектуру цепей поставок от линейной и фрагментированной к сетевой, IT-интегрированной и сервисно-ориентированной модели.

Несмотря на активное развитие исследований в области инновационных цифровых технологий и услуг в управлении цепями поставок, системного анализа применимости указанных решений в контексте нефтехимических предприятий недостаточно. Важное значение приобретает комплексная оценка зрелости технологий, степени их внедрения в отрасли, а также их экономической и операционной эффективности.

Цель данного исследования - провести анализ влияния инновационных цифровых технологий и услуг на трансформацию цепей поставок в нефтехимической отрасли. В рамках этого исследования поставлены следующие задачи:

- проанализировать существующие методы оценки эффективности практического использования инновационных цифровых технологий и услуг;
- проанализировать современные инновационные цифровые технологии и услуги в области логистики и управления цепями поставок;
- оценить зрелость и степень внедрения инновационных цифровых технологий и услуг в международной практике;
- оценить потенциальные экономические и операционные эффекты от внедрения инновационных цифровых технологий и услуг.

Научная новизна работы заключается в комплексном анализе инновационных цифровых технологий и услуг с акцентом на их применимость в нефтехимии, а также в оценке данных решений по критериям зрелости технологий, степени их внедрения, а также их экономической и операционной эффективности.

Методы исследования

В рамках данной работы применён междисциплинарный подход, сочетающий методы системного анализа, сравнительного обзора литературы и экспертной оценки.

В ходе исследования был проведен систематизированный обзор научной литературы, включая статьи из международных журналов. Изучены примеры внедрения цифровых логистических решений в деятельности международных и российских нефтехимических компаний (BASF, Shell, NOVA Chemicals, Dow, СИБУР и др.). Проанализированы отчёты отраслевых ассоциаций и консалтинговых агентств (McKinsey, PwC, BCG, Deloitte), содержащие количественные оценки внедрения цифровых технологий в логистике.

В настоящем исследовании рассмотрены восемь категорий инновационных решений, включающих как цифровые инструменты, так и новые виды услуг.

Для оценки зрелости технологий, степени их внедрения в отрасли, а также их экономической и операционной эффективности использовалась экспертная шкала оценки по шкале от 1 до 5, сформированная на основе изучения релевантных источников и интегральная оценка (S), рассчитываемая как средневзвешенное значение оценок по трем критериям. Используемая шкала оценки приведена в Таблице 1. Сравнительный анализ решений проведён с акцентом на международную практику, с последующей интерпретацией применительно к нефтехимическому комплексу.

Таблица 1

Используемая шкала оценки

Зрелость технологии (Z)	
Балл	Описание
1	Концепта технологии или НИОКР; отсутствуют промышленные прототипы.
2	Пилотные проекты и ограниченные тестовые внедрения; низкая стандартизация.
3	Технология демонстрирует устойчивые результаты в отдельных компаниях;
4	Технология широко применяется в ведущих отраслях; существуют зрелые программно-аппаратные решения и отраслевые стандарты.
5	Технология полностью зрелая и массово используется в логистике; устоявшаяся инфраструктура, высокая надёжность и масштабируемость.
Уровень внедрения (I)	
Балл	Описание
1	Используется единичными компаниями в формате эксперимента.
2	Внедрена на уровне пилотов или отдельных процессов в крупных компаниях.
3	Внедрена частично в операционную деятельность ведущих игроков отрасли.
4	Используется крупными участниками рынка в нескольких отраслях.
5	Широко внедрена в логистике и управлении цепями поставок как стандарт.
Экономическая эффективность (E)	
Балл	Описание
1	Отсутствуют достоверные данные о снижении издержек или повышении производительности; окупаемость не подтверждена.
2	Выгоды носят локальный характер; инвестиции часто превышают эффект.
3	Заметные эффекты достигаются при определённых условиях.
4	Подтверждённая экономия затрат или рост эффективности в различных кейсах; хорошая прогнозируемость возврата инвестиций.

5	Демонстрирует стабильные и значительные экономические выгоды; высокое соотношение «затраты–результат», быстрое внедрение оправдано.
---	---

Итоговая интегральная оценка (**S**) рассчитывается как средневзвешенное значение баллов по критериям по формуле (1):

$$S = \omega_Z \times Z + \omega_I \times I + \omega_E \times E \quad (1)$$

где: *Z* - балл по критерию Зрелость технологии;

I - балл по критерию Уровень внедрения;

E - балл по критерию Экономическая эффективность;

$\omega_Z, \omega_I, \omega_E$ - веса критериев.

С учетом фокуса на экономических показателях, веса критериев были выбраны следующим образом: $\omega_Z = 0,3$; $\omega_I = 0,3$; $\omega_E = 0,4$.

Использование предложенной пятибалльной шкалы и итоговой интегральной оценки в контексте сравнения различных цифровых технологий и услуг является оптимальным решением. Такой подход позволяет унифицировать оценку разнородных решений, находящихся на разных стадиях зрелости и реализуемых через разные технологические принципы - от аппаратных до платформенных и организационных. Это также позволяет агрегировать результаты в интегральную оценку, что невозможно сделать напрямую с применением методов анализа окупаемости инвестиций, оценки полной стоимости владения и других, описанных далее в исследовании, поскольку они оперируют разнотипными единицами измерения и логикой интерпретации. Кроме того, шкала устойчива к неполноте данных: даже при отсутствии точных экономических показателей можно сформировать обоснованное суждение.

Состояние исследований

Современный этап развития транспортно-логистических услуг характеризуется внедрением инновационных подходов и цифровых технологий. Для предприятий нефтехимического комплекса, инновационные цифровые технологии и услуги становятся эффективным инструментом для повышения устойчивости и эффективности цепей поставок [1]. Изучению инновационных цифровых технологий и услуг в управлении цепями поставок посвящен ряд исследований как российских, так и зарубежных авторов.

Владимир Щербаков и Галина Силкина исследуют теоретические и практические аспекты трансформации процесса управления цепями поставок в условиях цифровой экономики и приводят обоснование перехода от традиционных линейных моделей логистики к гибким сетевым структурам, основанным на принципах виртуальной интеграции [2].

В исследовании Наиры Барсегян и соавторов подчёркивается, что повышение конкурентоспособности нефтехимических предприятий требует цифровизации логистики, применения ресурсосберегающих технологий и гибких управленческих подходов [3].

В систематическом обзоре публикаций, посвящённых применению инновационных технологий в логистическом управлении, Александра Лагорио с коллегами выделяют несколько проблемных областей: низкий уровень интеграции ИТ-систем между участниками цепей поставок, изучение различий между входящей и исходящей логистикой, недостаточная вовлеченность малого и среднего бизнеса в цифровую трансформацию логистических процессов [4].

Таким образом, внедрение инновационных технологий Индустрии 4.0 и организационных трансформаций, становится ключевым фактором повышения эффективности и устойчивости цепей поставок в нефтехимической отрасли.

Исследования подчёркивают важность перехода от традиционных линейных моделей к гибким цифровым экосистемам, в которых логистические платформы, виртуальная интеграция и сквозная цифровизация обеспечивают адаптивность и конкурентоспособность предприятий.

Методы оценки эффективности практического использования инновационных цифровых технологий и услуг в управлении цепями поставок

Эффективность практического использования инновационных цифровых технологий и услуг в управлении цепями поставок требует объективной и многоаспектной оценки, позволяющей обосновать целесообразность инвестиций или изменения операционной модели. Ниже представлены основные подходы, используемые в научной и корпоративной практике для оценки эффективности практического применения инновационных цифровых решений.

1. Анализ окупаемости инвестиций

Одним из наиболее распространённых методов является расчёт окупаемости инвестиций (Return on Investment, ROI), который позволяет оценить соотношение между полученными выгодами и первоначальными вложениями. Высокое значение коэффициента ROI свидетельствует о быстрой окупаемости и высокой эффективности при внедрении.

Важно учитывать, что в случае с высокотехнологичными решениями эффект может носить отсроченный или интегральный характер, что требует корректного учета горизонта планирования и применения дополнительных методов для повышения точности оценки.

2. Оценка по ключевым показателям эффективности

Методика оценки по ключевым показателям эффективности (Key Performance Indicators, KPI) позволяет количественно и качественно фиксировать изменения в цепях поставок от внедрения инновационных решений на основе заранее определённых метрик. Показатели эффективности могут определяться индивидуально для каждого отдельного процесса или технологии. Методика особенно эффективна при оценке инкрементальных инноваций, внедрение которых оказывает непосредственное влияние на операционные процессы.

3. Модель SCOR

Модель Supply Chain Operations Reference (SCOR) представляет собой универсальный инструмент анализа, оценки и оптимизации процессов в цепях поставок. В основе модели лежит декомпозиция логистических процессов на пять базовых категорий: планирование, снабжение, производство, доставка и возврат. Применение модели SCOR позволяет не только стандартизировать подход к оценке эффективности логистических операций, но и установить причинно-следственные связи между внедрением технологических инноваций и изменениями в показателях результативности.

4. Метод оценки совокупной стоимости владения

Метод оценки совокупной стоимости владения (Total Cost of Ownership, TCO) основан на комплексном учёте всех категорий затрат, связанных с жизненным циклом технологии. В отличие от методов, акцентирующих внимание исключительно на капитальных вложениях, модель TCO охватывает как первоначальные инвестиции, так и последующие операционные, эксплуатационные и транзакционные издержки, включая затраты на интеграцию, техническую поддержку, обновление, адаптацию и обучение персонала. Такая методология особенно актуальна в условиях

цифровизации логистики, где значительную долю совокупных расходов формируют скрытые и отложенные затраты, возникающие при использовании высокотехнологичных решений.

5. Сценарный анализ и имитационное моделирование

Сценарный анализ и имитационное моделирование являются инструментами оценки эффективности инновационных технологий в условиях высокой неопределённости. Сценарный подход позволяет формализовать различные варианты развития внешней и внутренней среды предприятия, моделируя влияние ключевых факторов на результаты внедрения технологии. Имитационное моделирование обеспечивает возможность количественной оценки поведения сложных логистических систем в условиях изменяющихся параметров и допущений, не прибегая к вмешательству в реальные процессы. Интеграция сценарного анализа и имитационного моделирования в практику оценки способствует более обоснованному принятию решений, позволяя выявить критические зоны риска, оценить диапазон возможных эффектов от внедрения технологии и выбрать наиболее устойчивую траекторию её развития.

6. Методика сбалансированной системы показателей

Сбалансированная система показателей (Balanced Scorecard, BSC) позволяет оценить не только экономические, но и стратегические, операционные эффекты внедрения технологий. Методика охватывает четыре перспективы: финансы, клиенты, внутренние процессы и обучение/рост. Применение BSC особенно эффективно для оценки системных преобразований, таких как переход на модель «логистика как услуга».

Помимо традиционных методик исследователи также предлагают более инновационные и глубокие подходы по оценке эффективности практического использования инновационных технологий.

Представляет интерес методика оценки коммерческого потенциала (КП), разработанная Беатой Белиной с коллегами [5]. Эта методика предусматривает комплексную оценку инновационных решений по четырём ключевым направлениям: технологическая зрелость, рыночный спрос, экономическая целесообразность и правовая защищённость. Внутри каждого направления используются частные критерии, всего 32 критерия, которым присваиваются весовые коэффициенты и экспертные оценки. Итоговый индекс КП рассчитывается как взвешенная сумма значений, что обеспечивает объективную и сопоставимую оценку решений на различных этапах их жизненного цикла.

В статье Ларисы Исмагиловой и Надежды Суховой представлена модель комплексной оценки инновационных технологий, основанная на четырех интегральных критериях: новизне, производственной реализуемости, коммерческом спросе и универсально значимом эффекте [6]. Применение данной модели позволяет сопоставлять альтернативные технологические решения и принимать обоснованные решения о внедрении на основе многомерного сравнительного анализа.

Татьяна Александрова с коллегами в своем исследовании предложили мультикритериальный подход к оценке эффективности инновационных проектов, основанный на совмещении количественных и качественных методов, адаптированных к особенностям инновационной деятельности [7]. Методика разработана с учётом ограничений традиционных финансовых моделей, неспособных охватить широкий спектр эффектов инновационных решений.

Преимущества и ограничения описанных выше методов оценки эффективности инновационных технологий и услуг приведены в Таблице 2.

Таблица 2

Преимущества и ограничения методов оценки эффективности практического использования инновационных цифровых технологий и услуг

Метод	Преимущества	Ограничения
ROI	Универсальность и простота применения, однозначность оценки, возможность сравнения альтернатив.	Не учитывает временной фактор, нематериальные эффекты, риски. Высокая чувствительность к допущениям при расчетах.
KPI	Гибкость в подборе метрик, возможность оценки инкрементальных улучшений.	Риск подмены целей, ограниченность при оценке долгосрочных последствий, сложность нормализации и сравнения.
SCOR	Системность, стандартизация оценки, возможность проводить сравнение.	Высокая сложность применения, фокус на операционных процессах, без учета нематериальных аспектов.
TCO	Учет всех видов затрат, оценка «долгосрочных решений», сочетаемость с другими методами оценки, актуален для оценки аутсорсинга и платформенных решений.	Сложность сбора и нормализации данных, чувствительность к предположениям, оценивает только затраты и не учитывает выгоды, требует постоянной актуализации, не учитывает риски.
Сценарный анализ и моделирование	Оценка при высокой неопределенности, определение критических точек и рисков, анализ «что если?», оценка синергий от внедрения решений.	Ресурсоемкость, требует вовлечение экспертов, сложность в интерпретации результатов, риск переусложнения.
BSC	Стратегическая направленность, комплексность оценки, возможность «стратегического управления», учитывает как результаты, так и процессы.	Сложность построения и настройки, субъективность выбора показателей, сложность количественной интерпретации, ориентирован на долгосрочное планирование.
Оценка КП	Комплексность, балльная оценка, применимость на ранней стадии, адаптируемость под конкретные отраслевые задачи.	Зависимость от качества экспертной оценки, зависимость от методологической проработки, оценка решения «в моменте» без учета динамики развития.
Модель Исмагиловой - Суховой	Многоаспектность оценки, оценка интеграции технологии в реальное производство, наглядность результатов, оценка на уровне предприятия и отрасли.	Высокая методологическая сложность, субъективность оценки, ограниченная применимость для краткосрочных решений.
Мультикритериальная оценка	Учет социальных, рыночных и научных эффектов, интеграция количественных и качественных оценок, применимость в условиях высокой неопределенности.	Высокая субъективность, сложность применения при большом числе проектов, не использует процедуры оценки рисков.

Для получения объективной и многогранной оценки, оптимальным является комбинированное применение методов, при котором компенсируются ограничения одних методов за счёт достоинств других. В Таблице 3 приведены наиболее эффективные сочетания методов оценки.

Таблица 3

Наиболее эффективные сочетания методов для проведения комплексной оценки

Сочетание методов	Пояснение	Когда применять
ROI + TCO + KPI	ROI - окупаемость; TCO - полные затраты; KPI - операционные эффекты.	Обоснование инвестиций в конкретные технологии (IoT, AI, цифровые платформы).
SCOR + KPI + BSC	SCOR - анализ логистической архитектуры; KPI - контроль процессов; BSC - стратегическая связь.	Трансформация логистической сети, внедрение цифровых платформ управления мультимодальной логистикой.
BSC + Сценарный анализ + ROI	BSC - стратегическая рамка; Сценарный анализ - устойчивость; ROI - окупаемость.	Разработка новой модели логистики, выход на новые рынки, переход на модель LaaS.
Модель Исмагиловой-Суховой + SCOR + ROI	Модель Исмагиловой-Суховой - новизна, спрос, эффект; SCOR - процессы; ROI - окупаемость.	Оценка комплексных технологий, затрагивающих производственно-логистическую систему.

В завершение рассмотрения методов оценки эффективности инновационных технологий следует подчеркнуть, что универсального подхода, одинаково подходящего для всех типов инноваций, не существует. Логика выбора метода оценки должна основываться на природе инновации, стадии её жизненного цикла и целях внедрения. Рекомендуется комплексное сочетание количественных и качественных методик при оценке.

Инновационные технологии и услуги в управлении цепями поставок

1. Интернет вещей

Интернет вещей - это концепция, которая описывает систему взаимосвязанных физических устройств, оснащенных встроенными датчиками, сенсорами и средствами связи [8]. На сегодняшний день IoT широко применяется в логистических и технологических процессах.

Эффекты от использования IoT в логистике хорошо изучены. По данным компании Maersk, внедрение IoT-сенсоров и связанных систем мониторинга позволяет значительно оптимизировать процессы: производительность транспортировки и складирования повышается на 10–20% в краткосрочной перспективе, и на 20–40% в горизонте 2–4 лет.

Оценка:

- Зрелость технологии - **5/5**. Базовая IoT-инфраструктура доступна и используется, рынок наполнен предложениями.
- Уровень внедрения - **4/5**. Лидеры отрасли активно внедряют IoT, что подтверждается опросами, однако повсеместного распространения технология еще не получила.
- Экономическая эффективность - **5/5**. Внедрение IoT-решений позволяет существенно снизить издержки и повысить эффективность.

2. Цифровые двойники цепей поставок

Цифровой двойник представляет собой виртуальную модель физической логистической системы. Крупные промышленные холдинги создают цифровые двойники, содержащие в себе параметры всех производств, входящих в холдинг. За счет этого может производиться балансировка и оптимизация материальных потоков как внутри одного предприятия, так и между всеми предприятиями, входящими в холдинг что значительно повышает эффективность. Цифровые двойники также

используются для симуляции процессов, связанных с логистикой сырья и готовой продукции.

На сегодняшний день известно о нескольких промышленных референсах среди нефтехимических компаний: BASF использует цифровые двойники для моделирования сценариев морских перевозок, а Dow Chemical в партнёрстве с Siemens реализовала пилотный проект по созданию цифровой модели логистической сети, включающей склады, транспорт и производственные площадки.

Оценка:

- Зрелость технологии - **3/5**. Инструменты проходят стадию становления, стандартные платформы только формируются, большинство компаний пока не имеют готового цифрового двойника всей цепи поставок.
- Уровень внедрения - **3/5**. Внедрение ограничено пилотными проектами у лидеров и отдельными применениями, широкого распространения в нефтехимическом секторе на данный момент нет, хотя интерес высок и ожидается рост.
- Экономическая эффективность - **4/5**. Внедрение цифровых двойников цепей поставок дает значимые и измеримые результаты, однако требуемые инвестиции и сложность внедрения несколько усложняют достижение экономических выгод [9].

3. Искусственный интеллект

Системы на основе технологий искусственного интеллекта (ИИ) применяются в широком спектре задач, включая оптимизацию запасов, прогнозирование спроса, планирование производства, маршрутизацию транспортных потоков, предиктивное обслуживание оборудования и другие направления логистики и управления цепями поставок [10].

ИИ-решения уже внедрены в бизнес-процессы крупных логистических компаний, например система оптимизации маршрутов ORION позволяет UPS экономить 300–400 миллионов долларов ежегодно. Для нефтехимических компаний ИИ-решения особенно ценны в прогнозировании спроса на нефтехимическую продукцию и в предиктивном обслуживании оборудования. Отмечается, что интегрированные ИИ-платформы, охватывающие всю цепь поставок, обладают уровнем окупаемости в 3,5 раза выше, чем у обособленных, точечных решений.

Оценка:

- Зрелость технологии - **4/5**. Методы и алгоритмы доступны и отработаны, распространены решения в коммерческом ПО, крупные игроки массово инвестируют во внедрение ИИ-технологий. Однако при интеграции с существующими системами всегда требуется серьезная доработка.
- Уровень внедрения - **3/5**. Многие компании уже применяют хотя бы отдельные ИИ-решения и в целом это направление считается «обязательным», однако не всем удалось достичь полного внедрения на практике.
- Экономическая эффективность - **5/5**. ИИ-технологии признаны технологиями с наибольшим трансформационным потенциалом в цепях поставок. Проекты с использованием ИИ характеризуются существенными экономическими эффектами.

4. Цифровые платформы управления мультимодальной логистикой

Инновации в этой области связаны с интеграцией данных и управлением всей мультимодальной цепочкой поставок в реальном времени как единым, координированным процессом. Речь идёт о цифровых платформах и системах мониторинга, обеспечивающих прозрачность логистической цепочки на всех этапах и динамическое управление маршрутом в зависимости от текущей ситуации [11].

Внедрение цифровых платформ управления мультимодальной логистикой (ЦПУМЛ) позволяет существенно повысить операционную эффективность компаний. Во всех отраслях отмечается снижение годовых транспортных расходов на 10-40% и рост уровня использования оборудования на 2-10%, что связано с более точным планированием и управлением ресурсами.

Оценка:

- Зрелость технологии - **4/5**. Необходимые технологии существуют и активно применяются, однако полная интеграция всех модальностей еще сталкивается с барьерами - не все перевозчики цифровизированы на 100%, требуется согласование стандартов, тем не менее, технически задача решаемая.
- Уровень внедрения - **4/5**. Среди крупных глобальных компаний и их логистических партнеров практика использования цифровых платформ мониторинга в реальном времени уже стала нормой. Ожидается, что в ближайшие несколько лет ~67% всех компаний достигнут необходимого уровня цифровой интеграции.
- Экономическая эффективность - **4/5**. Внедрение ЦПУМЛ требует значительных инвестиций, архитектурной интеграции, а также квалифицированной команды. Реальный эффект зависит от степени зрелости ИТ-инфраструктуры компании, доступности качественных данных, уровня цифровизации партнёров по цепочке поставок и готовности к организационным изменениям.

5. Электронный обмен данными

Логистические операции традиционно сопровождаются большим количеством документов - договорные документы, первичные документы, накладные, коносаменты, таможенные декларации, сертификаты и другие виды документов. Автоматизация документооборота позволяет перевести процессы, связанные с оформлением документов в цифровой формат, существенно ускорив и упростив транзакции.

Автоматизация документооборота достигается благодаря применению технологий электронного обмена данными (Electronic Data Interchange, EDI). Концепция EDI это общий подход и набор стандартов для автоматизированного обмена электронными документами между информационными системами компаний без участия человека [12].

Использование электронного обмена данными устраняет задержки при оформлении и устраняет риск потери бумаг. Также, существуют специализированные платформы обмена электронными версиями международной товарно-транспортной накладной e-CMR.

Оценка:

- Зрелость технологии - **5/5**. Технологии электронного обмена данными обладают высокой степенью зрелости и активно применяются в различных отраслях.
- Уровень внедрения - **4/5**. Распространение EDI остаётся неравномерным: в крупных компаниях технологии EDI активно используются, тогда как в малом и среднем бизнес их внедрение ограничено из-за стоимости и сложности интеграции с существующими системами.
- Экономическая эффективность - **5/5**. Отказ от бумажного документооборота приносит быструю и доказанную экономию. Срок окупаемости инвестиций в проекты по автоматизации документооборота составляет менее 2 лет.

6. Умные контейнеры

Концепция умных контейнеров подразумевает оснащение транспортной тары (контейнеров, цистерн) датчиками и средствами связи для непрерывного мониторинга груза. Такие контейнеры сами становятся элементами IoT, передавая информацию об условиях перевозки и местонахождении, что значительно повышает сохранность груза [13].

Умные контейнеры облегчают логистические операции: порт и склад точно знают, где какой контейнер, появляется возможность автоматизировать учет. Кроме того, появляется возможность оптимизировать использование парка контейнеров.

Оценка:

- Зрелость технологии - **5/5**. Технология умных контейнеров технически зрелая: устройства надёжно отслеживают местоположение, температуру, вибрации и другие параметры в реальном времени.
- Уровень внедрения - **4/5**. Уровень внедрения ограничен, умные контейнеры в основном используются крупными компаниями, например, Нарпак-Lloyd и Maersk и преимущественно в высокочувствительных сегментах.
- Экономическая эффективность - **3/5**. Трудно оценить прямой возврат инвестиций от использования умных контейнеров, однако совокупный эффект от снижения рисков, повышения управляемости и оптимизации затрат может быть достаточно высоким, особенно в чувствительных сегментах таких как фармацевтика и продукты питания.

7. Управление логистическими рисками в реальном времени

Традиционно риск-менеджмент в цепях поставок (SCRM) носил реактивный характер. Инновационные инструменты позволяют перейти к проактивному и даже предиктивному управлению рисками. За счёт интеграции данных о перемещении грузов, погодных условий, геополитических событий и других факторов, специализированные системы могут в режиме реального времени выявлять угрозы и предлагать альтернативные решения [14].

Исследования показывают, что компании, внедрившие проактивное управление рисками цепи поставок, уменьшили вероятность сбоя в цепи поставок на 20% по сравнению с теми, кто действует реактивно.

Оценка:

- Зрелость технологии - **4/5**. На рынке существуют готовые ИТ-решения и компании, специализирующиеся на управлении рисками в цепях поставок. Однако технологии развиваются и сейчас происходит активная интеграция новых технологий.
- Уровень внедрения - **3/5**. SCRM в реальном времени, активно используется в цепях поставок крупных компаний в секторах потребительских товаров, фармацевтики, автопрома и высоких технологий. Однако в малом и среднем бизнесе инструменты SCRM внедрены фрагментарно.
- Экономическая эффективность - **4/5**. Риск-менеджмент не генерирует прибыль непосредственно, но он предотвращает крупные убытки и позволяет оптимизировать цепь поставок, и благодаря этому достигается экономия.

8. Логистика как услуга

Концепция Логистика как услуга (Logistics-as-a-Service, LaaS) это подход, при котором широкий перечень логистических функций передается на аутсорс единому провайдеру, предоставляющему интегрированный сервис [15]. Для бизнеса модель LaaS привлекательна своей гибкостью, снижением капитальных затрат а также доступом к новейшим технологиям без необходимости развивать их внутри компании. Уменьшаются затраты на персонал, обучение.

Для нефтехимических компаний LaaS создает возможность передать логистику профессиональным провайдерам, что способствует снижению управленческой сложности и дает возможность сосредоточиться на основном бизнесе. Необходимо отметить, что LaaS несет в себе риск зависимости от провайдера услуг. Передавая критически важную функцию на сторону, компания должна быть уверена в надежности и компетентности провайдера.

Оценка:

- Зрелость технологии/модели - **4/5**. Сама идея аутсорсинга логистики не нова, но именно в виде услуги, с цифровой платформой - это относительно новый формат.
- Уровень внедрения - **3/5**. Большинство компаний в той или иной степени используют внешние логистические услуги, однако полностью модель LaaS редко бывает интегрирована в бизнес-процессы крупных предприятий.
- Экономическая эффективность - **5/5**. LaaS приводит к снижению совокупных логистических издержек.
- В Таблице 4 сведены оценки наиболее перспективных инновационных цифровых технологий и услуг по критериям экономической эффективности, зрелости технологии и уровня внедрения. Оценки носят экспертно-аналитический характер на основе рассмотренных источников.

Таблица 4

Сводная таблица с оценками инновационных цифровых технологий и услуг

Категория решения	Зрелость технологии	Уровень внедрения	Экономическая эффективность	Интегральная оценка (S)
Интернет вещей (IoT)	5	4	5	4,7
Цифровые двойники цепей поставок	3	3	4	3,4
ИИ	4	3	5	4,1
ЦПУМЛ	4	4	4	4
EDI	5	4	5	4,7
Умные контейнеры	5	4	3	3,9
SCRM	4	3	4	3,7
LaaS	4	3	5	4,1

Перечисленные цифровые технологии и логистические услуги образуют взаимосвязанную экосистему, в которой цифровые инструменты не только обеспечивают инфраструктурную основу, но и радикально трансформируют характер логистических услуг.

Интернет вещей и умные контейнеры служат сенсорной основой, обеспечивая сбор данных в режиме реального времени о состоянии грузов, транспортных средств и инфраструктуры. Эти данные поступают в цифровые платформы управления мультимодальной логистикой, которые с использованием искусственного интеллекта осуществляют динамическую оптимизацию маршрутов, прогнозирование рисков и автоматическое перераспределение ресурсов. Цифровые двойники, в свою очередь,

моделируют логистические процессы и объекты в виртуальной среде, предоставляя средства для тестирования сценариев, оценки последствий и стратегического планирования. Электронный обмен данными обеспечивает достоверность, прозрачность и юридическую значимость обмена информацией между участниками логистических операций.

Таким образом, цифровые технологии и услуги выполняют не только вспомогательную, но и функционально-трансформирующую роль: они создают новую архитектуру логистических сервисов, в которой цифровизация становится неотъемлемым условием эффективности, устойчивости и конкурентоспособности.

Заключение

Анализ инновационных цифровых технологий и услуг в области управления цепями поставок нефтехимических предприятий продемонстрировал их стратегически значимую роль в трансформации традиционных цепей поставок в высокотехнологичные, устойчивые и адаптивные цифровые экосистемы.

Все рассмотренные инновации взаимосвязаны и дополняют друг друга, образуя основу цифровой логистической экосистемы. Внедрение одного решения часто требует или стимулирует внедрение другого. Таким образом, трансформация носит комплексный характер. Компании получают наибольший эффект, комбинируя несколько цифровых технологий.

Наиболее высокую интегральную оценку S получили технологии интернета вещей, искусственного интеллекта и электронного обмена данными. Важное значение приобретает модель Logistics-as-a-Service как концептуальное переосмысление роли логистики в бизнесе: переход от капиталоемкой функции к гибкой услуге позволяет нефтехимическим предприятиям снизить транзакционные издержки, повысить масштабируемость операций и сосредоточиться на развитии ключевых компетенций.

Таким образом, поставленные цели исследования достигнуты: проанализированы существующие методы оценки эффективности практического использования инновационных цифровых технологий и услуг, предложены наиболее эффективные сочетания методов оценки, проведена комплексная оценка зрелости, уровня внедрения и экономической целесообразности цифровых логистических решений, выявлены наиболее перспективные направления их применения в нефтехимическом комплексе. Полученные результаты обладают высокой прикладной значимостью и могут быть использованы для разработки корпоративных стратегий цифровизации.

В качестве перспективных направлений дальнейших научных исследований следует рассматривать: разработку интеграционных моделей взаимодействия цифровых решений, а также вопросы обеспечения киберустойчивости и подготовки квалифицированного кадрового резерва.

В будущем успешность нефтехимических предприятий во многом будет зависеть от того, насколько глубоко они интегрируют инновации в свои бизнес процессы. Ключевой вывод и рекомендация - не рассматривать новые цифровые технологии изолированно, а строить целостную цифровую экосистему цепи поставок, в которой решения принимаются на основе аналитики и автоматизации, а устойчивость и адаптивность заложены в саму архитектуру системы.

Список литературы

1. Doulabi H., Khamseh A., Torabi T. Evaluation of Key Factors Influencing Technological Innovation Management in the Petrochemical Industry with a Focus on Chemical Companies // *Pet. Bus. Rev.* - 2022. - Vol. 6, № 3. - С. 1–16.
2. Shcherbakov V., Silkina G. Supply Chain Management Open Innovation: Virtual Integration in the Network Logistics System // *J. Open Innov. Technol. Mark. Complex.* - 2021. - Vol. 7, № 1. - С. 54.

3. Barsegyan N. V., Salimyanova I. G., Kushaeva E. R. Typology of innovation strategies for petrochemical enterprises // J. Phys. Conf. Ser. - 2020. - Vol. 1515, № 4. - С. 042090. DOI: 10.1088/1742-6596/1515/4/042090.
4. Lagorio A. и др. A systematic literature review of innovative technologies adopted in logistics management // Int. J. Logist. Res. Appl. - 2022. - Vol. 25, № 7. - С. 1043–1066.
5. Belina B. и др. Setting of criteria in the commercial potential assessment method of innovative technological solutions // Probl. Eksploat. - 2013.
6. Ismagilova L. A., Sukhova N. A. Assessment of quality of innovative technologies // Int. J. Qual. Res. - 2016. - Vol. 10, № 4.
7. Alexandrova T. V., Zhukovskaya S. L., Voevodkin N. Y. The development of a multi-criteria approach to assess innovative projects efficiency // Rev. Espac. ISSN. - 2018. - Vol. 798, № 1015. - С. 22.
8. Бухалкин Д. Д., Костров В. Н., Чеботарев В. С. Роль интернета вещей в цифровой трансформации логистики нефтехимических предприятий // Экономика: вчера, сегодня, завтра. - 2024. - Т. 14, № 9А. - С. 459–471.
9. Digital twins: The key to unlocking end-to-end supply chain growth [Электронный ресурс] // McKinsey & Company. - URL: <https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/our-insights/digital-twins-the-key-to-unlocking-end-to-end-supply-chain-growth#/> (дата обращения: 27.05.2025).
10. Boute R. N., Udenio M. AI in Logistics and Supply Chain Management // Global Logistics and Supply Chain Strategies for the 2020s. - Cham: Springer International Publishing, 2023. - С. 49–65.
11. Trzuskawska-Grzesińska A. Control towers in supply chain management - past and future // J. Econ. Manag. - 2017. - Vol. 27. - С. 114–133.
12. Шалдыбин И. И., Литовченко В. Б., Додорина И. В. Электронный документооборот в логистике // Наука и образование транспорту. - 2020. - № 1. - С. 219–222. - EDN YQRKEY.
13. Дергачева В., Попова А. С. Перспективы развития цифровой логистики в России: умные контейнеры и склады, дроны // Стратегии бизнеса. - 2022. - Т. 10, № 12. - С. 301–305. DOI: <https://doi.org/10.17747/2311-7184-2022-12-301-305>.
14. Aljohani A. Predictive Analytics and Machine Learning for Real-Time Supply Chain Risk Mitigation and Agility // Sustainability. - 2023. - Vol. 15, № 20. - С. 15088.
15. Klingebiel K., Wagenitz A. An Introduction to Logistics as a Service. - 2013. - С. 209–216.

References

1. Doulabi H., Khamseh A., Torabi T. Evaluation of Key Factors Influencing Technological Innovation Management in the Petrochemical Industry with a Focus on Chemical Companies // Pet. Bus. Rev. - 2022. - Vol. 6, № 3. - P. 1–16.
2. Shcherbakov V., Silkina G. Supply Chain Management Open Innovation: Virtual Integration in the Network Logistics System // J. Open Innov. Technol. Mark. Complex. - 2021. - Vol. 7, № 1. - P. 54.
3. Barsegyan N. V., Salimyanova I. G., Kushaeva E. R. Typology of innovation strategies for petrochemical enterprises // J. Phys. Conf. Ser. - 2020. - Vol. 1515, № 4. - P. 042090. DOI: 10.1088/1742-6596/1515/4/042090.
4. Lagorio A. et al. A systematic literature review of innovative technologies adopted in logistics management // Int. J. Logist. Res. Appl. - 2022. - Vol. 25, № 7. - P. 1043–1066.
5. Belina B. et al. Setting of criteria in the commercial potential assessment method of innovative technological solutions // Probl. Eksploat. - 2013.
6. Ismagilova L. A., Sukhova N. A. Assessment of quality of innovative technologies // Int. J. Qual. Res. - 2016. - Vol. 10, № 4.
7. Alexandrova T. V., Zhukovskaya S. L., Voevodkin N. Y. The development of a multi-criteria approach to assess innovative projects efficiency // Rev. Espac. ISSN. - 2018. - Vol. 798, № 1015. - P. 22.
8. Bukhalkin D. D., Kostrov V. N., Chebotarev V. S. Rol' interneta veshchey v tsifrovoy transformatsii logistiki neftekhimicheskikh predpriyatiy [The role of Internet of Things in the digital transformation of logistics in petrochemical enterprises] // Ekonomika: Vchera, Segodnya, Zavtra. - 2024. - Vol. 14, № 9А. - P. 459–471. (In Russ).

9. Digital twins: The key to unlocking end-to-end supply chain growth [Electronic resource] // McKinsey & Company. - Available at: <https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/our-insights/digital-twins-the-key-to-unlocking-end-to-end-supply-chain-growth#/> (accessed: 27.05.2025).
10. Boute R. N., Udenio M. AI in Logistics and Supply Chain Management // Global Logistics and Supply Chain Strategies for the 2020s. - Cham : Springer International Publishing, 2023. - P. 49–65.
11. Trzuskawska-Grzesińska A. Control towers in supply chain management - past and future // J. Econ. Manag. - 2017. - Vol. 27. - P. 114–133.
12. Shal'dybin I. I., Litovchenko V. B., Dodorina I. V. Elektronnyy dokumentooborot v logistike [Electronic document flow in logistics] // Nauka i obrazovanie transportu. - 2020. - № 1. - P. 219–222. (In Russ). EDN YQRKEY.
13. Dergacheva V., Popova A. S. Perspektivy razvitiya tsifrovoy logistiki v Rossii: umnye konteynery i sklady, drony [Prospects for the development of digital logistics in Russia: smart containers and warehouses, drones] // Strategii biznesa. - 2022. - Vol. 10, № 12. - P. 301–305. (In Russ). DOI: <https://doi.org/10.17747/2311-7184-2022-12-301-305>.
14. Aljohani A. Predictive Analytics and Machine Learning for Real-Time Supply Chain Risk Mitigation and Agility // Sustainability. - 2023. - Vol. 15, № 20. - P. 15088.
15. Klingebiel K., Wagenitz A. An Introduction to Logistics as a Service. - 2013. - P. 209–216.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Бухалкин Данила Дмитриевич, аспирант кафедры Логистики и Маркетинга, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: danilabukhalkin@yandex.ru

Danila D. Bukhalkin, doctoral student of the Department of Logistics and Marketing, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Костров Владимир Николаевич, д.э.н., профессор, заведующий кафедрой Логистики и Маркетинга, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: vnkostrov@yandex.ru

Vladimir N. Kostrov, doctor of economic sciences, professor, head of the Department of Logistics and Marketing, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 12.06.2025; опубликована онлайн 20.09.2025.
Received 12.06.2025; published online 20.09.2025.

УДК 656.076

DOI: 10.37890/jwt.vi84.621

Метод транспортного баланса в планировании работы флота на скоростных пассажирских линиях внутреннего водного транспорта

Д.В. Дрейбанд

ORCID: 0000-0003-0136-2495

Д.А. Коршунов

ORCID: 0000-0002-9908-4026

Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В статье рассматривается подход к планированию работы скоростных судов на маршрутах пассажирских перевозок по внутренним водным путям на основе расчёта транспортного баланса как соответствия провозной способности транспортных средств уровню спроса на перевозки со стороны населения. Во введении приводятся статистические данные по объемам перевозок пассажиров транспортом общего пользования, включая перевозки по внутренним водным путям РФ, определена цель и основные задачи исследования. В разделе «методы» охарактеризован метод транспортного баланса и особенности его применения с учётом специфики организации и планирования скоростных пассажирских перевозок по речным магистралям как со стороны государственных органов власти, так и транспортных коммерческих предприятий. В результатах приводится методика определения баланса провозной способности флота и спроса (объема перевозки) на транспортную услугу, приводятся результаты расчетов. В обсуждение выносятся вопросы развития данного метода в условиях увеличения пассажиропотоков, развития транспортных схем перевозок пассажиров, включая интер- и мультимодальные сообщения.

Ключевые слова: транспортный баланс, планирование, пассажирские перевозки, скоростные перевозки, речные магистрали.

The method of transport balance in fleet planning for high-speed inland waterway passenger lines

Dmitry V. Dreiband

ORCID: 0000-0003-0136-2495

Dmitry A. Korshunov

ORCID: 0000-0002-9908-4026

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article considers an approach to planning the operation of high-speed vessels on passenger transportation routes along inland waterways based on the calculation of the transport balance as the correspondence of the carrying capacity of vehicles to the level of demand for transportation from the population. The introduction provides statistical data on the volume of passenger transportation by public transport, including transportation by inland waterways of the Russian Federation, defines the purpose and main objectives of the study. The section "methods" describes the method of transport balance and the specifics of its application, considering the specifics of the organization and planning of high-speed passenger transportation along river highways by both government authorities and commercial transport enterprises. The results provide a methodology for determining the balance of the fleet's carrying capacity and demand (volume of transportation) for a transport service and provide the calculation results. The discussion focuses on the development of this

method in the context of increasing passenger traffic, the development of transport schemes for passenger transportation, including inter- and multimodal communications.

Keywords: transport balance, planning, passenger transportation, high-speed transportation, river highways.

Введение

Развитие перевозок пассажиров по внутренним водным путям РФ является ключевой стратегической задачей в рамках действующей Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года [1], это обусловлено значимостью социально-экономических аспектов для транспортной системы страны. Динамика объема перевозок пассажиров, а также структура пассажирских перевозок и пассажирооборота транспорта общего пользования показаны на рис.1-2 [2].



Рис. 1. Динамика объема перевозок пассажиров транспортом общего пользования

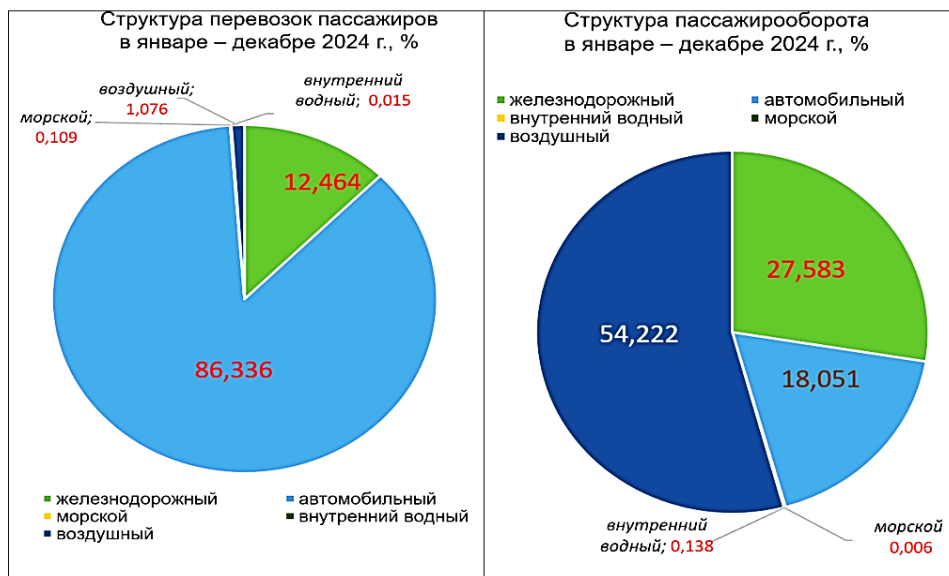


Рис. 2. Структура пассажирских перевозок и пассажирооборота в январе – декабре 2024 года

Как наглядно показано на рис.1-2 вклад внутреннего водного транспорта в перевозку населения нашей страны крайне незначительный и составляет менее 1%.

Лидирует традиционно автомобильный транспорт: транспорт: за счет отсутствия лишних трансферов, что более удобно для пассажиров. В то же время наблюдается тенденция к увеличению доли речных пассажирских перевозок на регулярных транспортных линиях. Особенно это характерно для приречных регионов в случаях размещения крупных населенных пунктов на берегу рек и возможности прямого речного сообщения. Более подробно динамика показателей перевозок пассажиров внутренним водным транспортом страны за два предшествующих периода показана в табл. 1. [2]

Таблица 1

Сведения о пассажирских перевозках на внутреннем водном транспорте РФ

	Объем перевозки пассажиров			Пассажирооборот		
	Январь – декабрь 2023 г.	Январь – декабрь 2024 г.	Январь – декабрь 2024 г. в % к январю – декабрю 2023 г.	Январь – декабрь 2023 г.	Январь – декабрь 2024 г.	Январь – декабрь 2024 г. в % к январю – декабрю 2023 г.
<i>Ед. изм.</i>	<i>тыс. чел.</i>			<i>тыс. пасскм</i>		
Всего	10 607,4	12 085,8	113,9	682 730,2	733 820,1	107,5
в том числе:						
транспортные	7 899,6	9 461,4	119,8	149 084,8	171 192,0	114,8
туристские	420,2	448,9	106,8	483 293,2	521 323,3	107,9
экскурсионно-прогулочные	2 287,6	2 175,5	95,1	50 352,2	41 304,8	82,0

Наибольшую долю в перевозках пассажиров по внутренним водным путям занимают транспортные, то есть регулярные сообщения. В этих условиях пилотный проект Минтранса РФ «Речные магистрали», запущенный в навигацию 2024 г., призван повысить привлекательность пассажирских маршрутов по внутренним водным путям страны за счет использования инновационного скоростного флота. Применение на речных линиях скоростных судов, способных перемещать пассажира с той же скоростью, что и автомобильный транспорт (60÷70 км/ч), позволяет привлечь новых клиентов.

При этом, для оптимизации планирования судоходными компаниями работы инновационного флота на речных скоростных линиях авторами предлагается использовать метод транспортных балансов, позволяющий сопоставить потребность в провозной способности флота и спрос на его услуги, определяемый величиной пассажиропотока на исследуемых маршрутах.

Актуальность выбранного авторами направления исследования обусловлена тем, что применение балансового метода в планировании пассажирских перевозок речным транспортом должно учитывать ряд отраслевых особенностей, связанных с законодательными, экономическими, социальными и культурными трендами. Отдельными факторами являются характеристика внутренних водных путей и состояние береговой инфраструктуры в приречных регионах страны, сезонность и продолжительность навигации, наличие преимуществ и недостатков конкурентных видов транспорта, возрастные и социальные характеристики пассажиров.

В этой связи исследование транспортных балансов в пассажирских перевозках является одним из основных инструментов для анализа и планирования транспортной

инфраструктуры, позволяет оценить объёмы перевозок, распределение пассажиропотоков и эффективность работы транспортной системы. Формирование транспортных балансов тесно связано с социально-экономическим и технологическим развитием территории нашей страны. Вопрос сбалансированности транспортной системы в сфере пассажирских перевозок стал всё чаще рассматриваться на государственном уровне. Важным аспектом стало создание сложных детализированных транспортных балансов пассажиропотоков при взаимодействии различных видов транспорта.

Целью настоящего исследования является разработка научного подхода к планированию работы скоростного флота на речных маршрутах. В ходе исследования ставились следующие задачи: анализ направлений и особенностей применения транспортного баланса при планировании работы скоростного флота судоходными компаниями; анализ исходных данных по пассажирским перевозкам и скоростным маршрутам на внутреннем водном транспорте; выбор и обоснование метода расчёта транспортного баланса применительно к речным скоростным пассажирским линиям.

Методы

Теория транспортных балансов разрабатывалась с 20-х годов XX века отечественными и зарубежными учёными, анализ которых был выполнен в рамках исследования Троилин В.В. и Арустамова М.И. [3]. Согласно этой теории, балансовый метод представляет собой систему учёта и анализа ресурсов, затрат и полученных результатов, основывается на принципах равновесия между доходами и расходами, спросом и предложением. Современные отечественные исследования посвящены разработке транспортно-экономических балансов при планировании грузоперевозок на водном и железнодорожном транспорте [4-8].

Применительно к пассажирским перевозкам по речным магистралям следует отметить, что модель воднотранспортной системы может быть как закрытой, в случае обслуживания исключительно местных пассажиропотоков, так и открытой, когда пассажиропоток формируется внутренними и внешними (транзитными) пассажирами, что обеспечивает значительный его прирост за счёт людей, следующих в международном сообщении. При этом балансовый подход основывается на использовании статистических методов оценки балансов, проведении регрессионного и кластерного анализа. С помощью статистических методов и анализа данных определены основные тенденции и закономерности в развитии пассажирских перевозок. Описательная статистика позволяет выявить и обобщить основные характеристики данных, определить средние значения, медианы, стандартные отклонения.

Авторами предлагается рассмотреть возможность применения балансового подхода к планированию в двух сферах – государственном управлении [9] и коммерческой деятельности транспортных компаний.

На государственном уровне планирование развития транспортной инфраструктуры с помощью балансового метода включает сбор данных и анализ потребностей в транспортных услугах, прогнозы изменения пассажиропотока, оценку существующих мощностей транспортных компаний, определение необходимых инвестиций в модернизацию инфраструктуры и подвижного состава. Балансовый метод позволяет анализировать и оптимизировать транспортные потоки. С помощью статистических данных и моделей можно выявить узкие места в транспортной системе, что способствует более эффективному распределению ресурсов. Это особенно важно в крупных городах, где высокая плотность движения требует тщательного планирования.

Балансовый метод также применим для мониторинга и оценки эффективности работы транспортных компаний. На основе данных о доходах и расходах, качестве

предоставляемых услуг своевременно выявляются проблемные зоны и принимаются меры для их устранения.

Сферы применения транспортных балансов и решаемые задачи показаны на рис.3.



Рис.3. Сферы применения транспортных балансов

Таким образом использование транспортных балансов позволит федеральным и региональным органам исполнительной власти формировать и оптимизировать систему транспортного обслуживания населения, а транспортным предприятиям планировать перевозочную деятельность на основе научно-обоснованных методов. То есть в условиях современного мира применение балансового метода становится одним из ключевых инструментов для оптимизации работы транспорта, инфраструктуры и повышения уровня эффективности транспортных услуг.

Результаты

В зависимости от целей исследования, полноты и достоверности исходных данных существует несколько методов определения баланса пассажирских перевозок. Важным этапом при этом является сбор и анализ статистических и прогнозных значений пассажиропотока, на основе которого составляется план перевозок, распределяется флот по направлениям и маршрутам, формируется расписание движения. Для построения баланса по каждой линии и направлению определяют провозную способность флота, которая зависит от типа судов, их количества, скорости движения, времени оборота, технико-эксплуатационных характеристик

береговой и причальной инфраструктуры, и других факторов. Провозная способность должна соответствовать прогнозируемому пассажиропотоку с учетом допустимых отклонений.

Авторами предлагается использовать метод расчёта транспортного баланса, основанный на изучении спроса и предложения в сфере оказания транспортных услуг населению. Модель транспортного баланса по мнению авторов настоящей статьи можно представить следующим образом – табл. 2.

Таблица 2

Модель транспортного баланса речной скоростной пассажирской линии

Корреспондирующие пункты транспортного маршрута	1	2	3	...	n	$\sum_{пр}$
1						
2						
3						
...						
n						
$\sum_{обр}$						$\sum P$

Обозначения, используемые в модели:

$\sum_{пр}$, $\sum_{обр}$ – спрос (количество пассажиров или купленных билетов) в пунктах посадки и высадки на исследуемом транспортном маршруте соответственно в прямом и обратном направлениях, чел.;

$\sum P$ – транспортной ресурс, например, в виде провозной способности флота на исследуемом маршруте, определяемый с учётом количества транспортных средств на маршруте, их вместимости, количества рейсов за расчётный период, чел.

При этом сумма полученных на основе статистических данных значений балансовой модели характеризует не только объем взаимной корреспонденции пассажиропотоков прямого и обратного направлений между остановочными пунктами транспортного маршрута, но и позволяет определить потребность в увеличении транспортного ресурса на основе соответствия спроса на транспортную услугу и имеющейся провозной способности транспортных средств.

В случае исследования транспортного баланса в целом по региону или транспортной компании в представленной модели значения 1,2,3...n будут являться маршрутами или альтернативными сообщениями, транспортный ресурс определяется как суммарная провозная способность ($\sum P$).

Также в рамках данного метода предлагается определять разницу (Z_i) между потребительским спросом и провозной способностью флота на конкретных маршрутах по выражению:

$$Z_i = \Pi_i - \sum P_i, \quad (1)$$

где Π_i – спрос или потребность в перевозке, определяемое как общее количество пассажиров, воспользовавшихся транспортной услугой на конкретном маршруте за расчётный период времени (час, сутки, месяц, год), чел.;

P_i – транспортный ресурс в виде провозной способности флота на i -ом маршруте с учётом количества транспортных средств на маршруте, их вместимости, количества рейсов за расчётный период, чел.

$$\Pi_i = \sum_{им} + \sum_{эк} \quad (2)$$

При нулевом или близком к нему значении вышеуказанной разности наблюдается сбалансированность пассажирских перевозок. Если значение получается больше нуля, то наблюдается дефицит ресурсов для удовлетворения спроса на пассажирские перевозки. Если остаток меньше нуля, то возможности транспортных компаний больше, чем необходимо.

В рамках управления транспортными системами со стороны государства или регионов авторами предлагается использовать метод расчёта транспортного баланса, основанный на изучении соотношения объема перевозок к спросу при оказании социально-значимых транспортных услуг населению по выражению:

$$B = V / П, \quad (3)$$

где B – баланс пассажирских перевозок;

V – объём выполненных транспортных услуг, фактический объём перевозок на определенной территории, чел.;

$П$ – объём потребности в перевозках, полученный на основе социально-экономических показателей и данных о численности населения, его мобильности, чел.

В результате расчёта вышеуказанного баланса пассажирских перевозок возможны следующие выводы:

$B = 1$, предложение полностью соответствует спросу, пассажирская транспортная система на данной территории удовлетворяет потребности населения в перевозках.

$B > 1$, предложение превышает спрос, наблюдается избыток транспортных мощностей для оказания услуг в сфере пассажирских перевозок, что может привести к неэффективному использованию ресурсов, снижению рентабельности и увеличению эксплуатационных расходов.

$B < 1$, спрос превышает предложение, наблюдается дефицит подвижного состава, что повлечёт перегрузку транспортных средств, наличие очередей на остановках общественного транспорта, снижение доступности транспортных услуг и рост негатива со стороны пассажиров. В этом случае можно обосновывать необходимость субсидирования.

Обсуждение

В условиях стремительного развития технологий балансовый метод может быть применен для оценки внедрения инновационных решений в транспортной сфере. Использование интеллектуальных транспортных систем, автоматизированных транспортных средств положительно отразится на эффективности и безопасности транспортных услуг. Детальный анализ затрат и выгод от внедрения таких технологий позволяет государству принимать обоснованные решения о целесообразности их использования.

Основными направлениями повышения эффективности использования данного метода являются увеличение доли инвестиций в исследование и прогнозирование потребностей пассажиров, разработка интегрированных мультимодальных маршрутов, применение современных информационных технологий и инноваций.

Используя методы временных рядов и регрессионного анализа возможно более точно спрогнозировать спрос на перевозки в разные периоды времени, в праздничные дни или во время крупных мероприятий. На основе данных о пассажиропотоке целесообразно проводить оптимизацию маршрутов, корректировать количество рейсов и интервалы движения, применять гибкую тарифную политику. Вышеуказанные мероприятия позволят повысить качество обслуживания пассажиров и снизить транспортные расходы компании перевозчика.

Несмотря на очевидные преимущества, применение балансового метода в транспортной сфере сопряжено с определенными трудностями и ограничениями. В основном это связано с необходимостью проведения глубокого анализа и прогнозирования на основе получения качественной и актуальной информации о пассажиропотоках, состоянии транспортной инфраструктуры и подвижного состава, потребностях населения, изменениях социальной и демографической ситуации, экологической обстановки. Со стороны государства является целесообразным создание современной системы мониторинга, сбора и обработки данных с

применением современных цифровых технологий, искусственного интеллекта, больших данных (Big Data).

В настоящее время транспортная система России включает множество уровней управления, от муниципальных до федеральных органов власти, что создает определенные сложности в координации действий и принятии решений. Применение балансового метода позволит достичь эффективного взаимодействия между различными уровнями власти и заинтересованными сторонами, включая частные транспортные компании, общественные организации и исследовательские учреждения, а также привлечь дополнительные источники финансирования с использованием механизмов государственно-частного партнерства и международных грантов.

В настоящее время наблюдается стремительное развитие цифровых технологий, что в свою очередь оказывает положительное влияние на формирование и применение транспортных балансов в пассажирских перевозках, повышает качество обслуживания и эффективность распределения ресурсов. Использование интернет-вещей, больших данных (Big Data), систем геолокации, мобильных приложений для планирования поездок позволяет собирать и анализировать информацию о пассажиропотоках в режиме реального времени, интегрировать данные из различных источников с целью более точного прогноза загруженности транспорта и оптимизации расписания движения. Развитие концепции «умных городов» позволяет гармонично и сбалансированно использовать искусственный интеллект и транспортную систему для улучшения качества транспортного обслуживания населения за счёт более точного анализа данных и прогнозирования пассажиропотока на основе изменяющихся условий и потребностей пользователей, таких как место проживания, работа и досуг.

В современных условиях глобального изменения климата, повышенного внимания к вопросам экологии и снижению выбросов углерода, акцент смещается в сторону развития экологически чистых видов транспорта на основе использования электрических двигателей. Это требует корректировки транспортных балансов с учётом новых факторов, таких как уровень загрязнения, потребления энергии, влияния на здоровье населения.

Заключение

Эффективное использование подвижного состава имеет большое экономическое значение для функционирования пассажирского транспорта. Под эффективностью использования подвижного состава подразумевается выполнение необходимого объема перевозок в конкретные сроки исходя из сложившегося или прогнозируемого пассажиропотока при минимальных затратах.

Для повышения эффективности применения транспортных балансов необходимо провести исследование зависимости между различными переменными. Например, между количеством пассажиров и временем суток, погодными условиями, ценами на билеты и т.д. Выявить сезонные колебания и тренды в пассажиропотоке, провести сегментацию пассажиров на группы с определенными характеристиками. Сравнительный анализ показателей эффективности транспортных балансов позволит выявить лучшие практики и адаптировать их к существующим условиям.

Список литературы

1. Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года. Режим доступа: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/11577>
2. Транспорт России. Статистический ежегодник 2011-2024 гг. Режим доступа: <https://mintrans.gov.ru/documents/7/13999>
3. Троилин В.В., Арустамова М.И. Проблемы становления понятия транспортно-экономического баланса. Управление экономическими системами: электронный

- научный журнал, 2017. Режим доступа: URL:
http://uecs.ru/index.php?option=com_flexicontent&view=items&id=4278
4. Арустамова М.И. Перспективы развития транспортно-экономического баланса Азово-черноморского бассейна. – Нижний Новгород: Изд-во: Волжский государственный университет водного транспорта // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2018. №56. - С. 105-112.
 5. Троилин В.В., Арустамова М.И. Теоретико-методические особенности формирования и расчета транспортно-экономического баланса в сфере морского транспорта. – Новороссийск, изд-во: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова//Вестник Государственного морского университета им. Адмирала Ф.Ф. Ушакова, 2018. №1 (22). – С. 5-8.
 6. Аксененко С.В. Оценка ожидаемого спроса на транспортные услуги в минерально-сырьевом комплексе области: автореферат дис. ... кандидата экономических наук : 08.00.05. — Новосибирск, 2006. — 23 с.
 7. Жуков Е. А., Федоренко А. И. О методологии разработки транспортно-экономических балансов // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). № 15., 2013.- С. 44-47.
 8. Система балансовых расчетов как основа формирования транспортно-экономических связей (на примере минерально-сырьевых ресурсов [Новосибирской области] / С. В. Аксененко, А. П. Дементьев, О. С. Краснов // ГЕО-Сибирь - 2005 : сб. материалов науч. конгр. (Новосибирск, 25-29 апр. 2005 г.). - Новосибирск, 2005
 9. Дрейбанд, Д.В., Коршунов, Д.А. Балансовый метод как эффективный инструмент стратегического планирования деятельности речного транспорта. Научные проблемы водного транспорта, (77), 119-129. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi77.423>

References

1. Transportnoj strategii Rossijskoj Federacii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda. Rezhim dostupa: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/11577>
2. Transport Rossii. Statisticheskij ezhegodnik 2011-2024 gg. Rezhim dostupa: <https://mintrans.gov.ru/documents/7/13999>
3. Troilin V.V., Arustamova M.I. Problemy stanovleniya ponyatiya transportno-ekonomicheskogo balansa. Upravlenie ekonomicheskimi sistemami: elektronnyj nauchnyj zhurnal, 2017. Rezhim dostupa: URL:
http://uecs.ru/index.php?option=com_flexicontent&view=items&id=4278
4. Arustamova M.I. Perspektivy razvitiya transportno-ekonomicheskogo balansa Azovo-chernomorskogo bassejna. – Nizhnij Novgorod: Izd-vo: Volzhskij gosudarstvennyj universitet vodnogo transporta // Vestnik Volzhskoj gosudarstvennoj akademii vodnogo transporta. 2018. №56. - S. 105-112.
5. Troilin V.V., Arustamova M.I. Teoretiko-metodicheskie osobennosti formirovaniya i rascheta transportno-ekonomicheskogo balansa v sfere morskogo transporta. – Novorossiysk, izd-vo: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Gosudarstvennyj morskoy universitet im. admiral F.F. Ushakova//Vestnik Gosudarstvennogo morskogo universiteta im. Admirala F.F. Ushakova, 2018. №1 (22). – S. 5-8.
6. Aksenenko S.V. Ocenka ozhidaemogo sprosa na transportnye uslugi v mineral'no-syr'evom komplekse oblasti: avtoreferat dis. ... kandidata ekonomicheskikh nauk : 08.00.05. — Novosibirsk, 2006. — 23 s.
7. Zhukov E. A., Fedorenko A. I. O metodologii razrabotki transportno-ekonomicheskikh balansov // MIR (Modernizaciya. Innovacii. Razvitie). № 15., 2013.- S. 44-47.
8. Sistema balansovyh raschetov kak osnova formirovaniya transportno-ekonomicheskikh svyazej (na primere mineral'no-syr'evykh resursov [Novosibirskoj oblasti] / S. V. Aksenenko, A. P. Dement'ev, O. S. Krasnov // GEO-Sibir' - 2005 : sb. materialov nauch. kongr. (Novosibirsk, 25-29 apr. 2005 g.). - Novosibirsk, 2005
9. Drejband, D.V., Korshunov, D.A. Balansovyy metod kak effektivnyj instrument strategicheskogo planirovaniya deyatel'nosti rechnogo transporta. Nauchnye problemy vodnogo transporta, (77), 119-129. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi77.423>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Коршунов Дмитрий Александрович, к.э.н.,
доцент, доцент кафедры логистики и
маркетинга, Волжский государственный
университет водного транспорта (ФГБОУ ВО
«ВГУВТ»), 603950, г.Нижний Новгород, ул.
Нестерова, 5, e-mail: voi82@yandex.ru

Dmitry A. Korshunov, PhD, Associate
professor of the Department of Logistics and
Marketing, Volga State University of Water
transport, 5, Nesterov st. Nizhny Novgorod,
603950

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: voi82@yandex.ru

Dmitry V. Dreiband, PhD, Associate
professor of the Department of Transport
Management, Volga State University of Water
transport, 5, Nesterov st. Nizhny Novgorod,
603950

Статья поступила в редакцию 11.06.2025; опубликована онлайн 20.09.2025.
Received 11.06.2025; published online 20.09.2025.

УДК 004.418:629.5

DOI: 10.37890/jwt.vi84.622

Цифровизация оценки качества подготовки специалистов для водного транспорта

О.А. Казьмина

ORCID: 0000-0002-6886-6383

С.Н. Тарануха

ORCID: 0000-0003-1231-3664

И.К. Фомина

ORCID: 0000-0003-0999-3339

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

Аннотация: Повышение качества образовательных услуг в сфере водного транспорта неразрывно связано с процессом его мониторинга, включающим организацию и получение обратной связи со стороны потребителей этих услуг, которая зачастую проводится посредством такого метода исследования как анкетирование. С целью повышения эффективности работы отраслевого университета актуальной является разработка и автоматизация комплексной системы анкетирования, использование которой позволит: сократить время на создание анкет и на обработку результатов анкетирования, обеспечить электронное хранение анкет и результатов анкетирования, обеспечить доступность результатов анкетирования для всех групп потребителей услуг ВУЗа, что является важным элементом предоставления качественных и востребованных (конкурентоспособных) образовательных услуг в целях развития отрасли водного транспорта. При реализации системы анкетирования важно учесть ряд отраслевых особенностей: это особенности реализации отраслевого образования, параметры оценки качества образовательных услуг, группы потребителей этих услуг.

Ключевые слова: водный транспорт, ВУЗ, отраслевое образование, анкетирование, качество образовательных услуг, конкурентоспособность, автоматизация, CMS

Digitalization of quality assessment of training water transport specialists

Olesya A. Kazmina

ORCID: 0000-0002-6886-6383

Svetlana N. Taranukha

ORCID: 0000-0003-1231-3664

Inga K. Fomina

ORCID: 0000-0003-0999-3339

Admiral S.O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint Petersburg, Russia

Abstract. Improving the quality of educational services in the field of water transport is inextricably linked with the process of its monitoring, including the organization and receipt of feedback from consumers of these services, which is often carried out through such a research method as a questionnaire.

In order to improve the efficiency of the industry university, it is important to develop and automate a comprehensive survey system, the use of which will allow: to reduce the time for creating questionnaires and processing survey results, to ensure electronic storage of questionnaires and survey results, ensure electronic storage of questionnaires and survey results, ensure availability of survey results for all groups of consumers of the university services, which is an important element in the provision of high-quality and in-demand

(competitive) educational services for the development of the water transport industry. When implementing a survey system, it is important to take into account a number of industry-specific features: these are the features of the implementation of industry education, parameters for assessing the quality of educational services, and groups of consumers of these services.

Keywords: water transport, university, industry education, survey, quality of educational services, competitiveness, automation, CMS

Введение

В современных условиях усиления конкуренции образовательных услуг и цифровой трансформации, важно создавать эффективные инструменты для обеспечения возможности ВУЗа не только оставаться на рынке, но и предлагать качественные и востребованные услуги, которые соответствуют системе мирового уровня. При этом актуальность наличия способности в конкурировании каждой образовательной организации напрямую зависит от уровня качества услуг и адекватности её стоимости, иначе говоря, от степени удовлетворенности запросов потребителей.

Оценить, насколько конкурентоспособны и качественны предоставляемые услуги отраслевого университета можно на основе использования метода анкетирования.

Анкетирование является одним из наиболее распространенных исследовательских методов. Несомненным достоинством метода анкетирования является быстрое получение массового материала, что позволяет проследить ряд общих изменений в зависимости от параметров. К недостаткам метода анкетирования можно отнести поверхностность анализа в связи с ограниченным охватом полноты ответов, сложности с установлением причинно-следственных связей, ошибки при выборе ответов и т.д., которые обычно нивелируют повторным анкетированием и добавлением других методов исследования.

Применение информационных технологий в обозначенном процессе, несомненно, позволит реализовать его более эффективно. Таким образом, целью исследования является формирование и представление концептуального подхода к цифровизации оценки качества подготовки специалистов для водного транспорта. Для достижения поставленной цели авторами решаются следующие задачи:

- разработка универсального унифицированного алгоритма оценки качества подготовки специалистов водного транспорта, применимого для всех транспортных ВУЗов;
- выявление факторов, влияющих на процесс оценки качества образования, а также представление концептуального подхода к его автоматизации;
- описание возможностей системы, позволяющей автоматизировать функционал по оценке качества образовательных услуг.

Алгоритм оценки качества образовательных услуг в отрасли

Для обеспечения оперативного и более эффективного мониторинга качества предоставляемых услуг, а также реализуя основной принцип системы менеджмента качества – постоянное улучшение и совершенствование, целесообразно рассмотреть возможность автоматизации процесса анкетирования в отраслевом ВУЗе.

Данной проблеме посвящено достаточно много научных работ в разных образовательных учреждениях в разных регионах [1-5], в них описаны готовые разработки и подходы к автоматизации анкетирования с использованием C#, SQ, системы 1С: Предприятие, табличного процессора и базы данных, системы управления контентом и других инструментов. В части автоматизации анкетирования

образовательных учреждений водного транспорта аналогичных публикаций не выявлено.

Авторами разработан алгоритм оценки качества образовательных услуг отраслевой образовательной организации, представляющий собой последовательность действий приводящих к определенной цели. Данный унифицированный алгоритм учитывает специфику отрасли, может быть применен для образовательных организаций отрасли. Описание алгоритма представлено ниже.

1. Цель оценки качества образовательных услуг.

Целью разработки алгоритма оценки качества образовательных услуг отраслевого университета является получение модели управления качеством в виде совокупности графических объектов (диаграмм), которая позволит при помощи проведения последовательных итераций на основе разных параметров улучшить качество услуг.

2. Предварительные маркетинговые исследования.

На этапе проводится: анализ системы менеджмента качества образовательного учреждения или группы отраслевых ВУЗов, анализ процесса мониторинга и измерения; обзор программных средств в области системы менеджмента качества, в том числе, возможности автоматизации анкетирования, и др.

3. Определение групп потребителей (объектов анкетирования).

На этом этапе проводится анализ деятельности отраслевого ВУЗа с выявлением основных участников образовательного процесса, что позволит при разработке и составлении анкет действовать целенаправленно и осмысленно для получения максимального результата (качество и количество вопросов, глубина проработки проблемы и т.д.). Полнота и правильность получаемого результата анкетирования во многом зависит от выбранных объектов анкетирования.

4. Обоснование целевых показателей качества образовательных услуг (предметов анкетирования) и разработка основной части вопросов.

Главной целью данного этапа является выявление и обоснование параметров (или показателей) качества образовательных услуг отраслевого университета, фактическая оценка которых возможна на основе ответов на вопросы по результатам анкетирования (с учетом итогов предыдущих шагов алгоритма).

При разработке основной части анкеты следует обратить внимание на содержание вопросов, их тип, последовательность представления, охват проблемы (параметра), наличие контрольных вопросов. Содержание вопросов анкеты должно характеризовать предмет анкеты. Необходимо определить, какую цель преследует каждый вопрос.

5. Выбор оценочной базы.

В качестве оценочной базы при проведении анкетирования в ВУЗе могут выступать: целевые (плановые) значения показателей со стороны отраслевых ведомств, Минобрнауки России, данные по другим отраслевым образовательным учреждениям, плановые показатели университета на выбранный период, показатели или результаты деятельности за прошлый период и др.

6. Обоснование концептуального подхода к оценке качества образовательных услуг.

При разработке концептуального подхода необходимо учитывать ряд особенностей реализации образовательных услуг, например, отраслевая принадлежность образовательного учреждения, выявленные группы потребителей, набор исследуемых показателей качества услуг и т.д.

7. Подготовка информационного обеспечения.

Результатом этапа является набор анкет (вопросов) по параметрам (показателям) исследования с учетом групп потребителей.

После создания первого варианта анкеты, следует провести предварительное тестирование анкеты с целью выявления ошибок. После получения заполненных анкет, необходимо провести анализ полученных ответов и соответствие полученной информации предъявляемым к анкете требованиям.

8. Разработка и реализация системы анкетирования.

На этом этапе реализуется непосредственно разработка и автоматизация системы анкетирования с помощью возможных инструментов, например, системы управления сайтом 1С-Битрикс: тогда в нужный модуль загружается подготовленное информационное обеспечение, выполняется настройка параметров, выполняется тестирование и контроль корректности системной реализации. Выполняется размещение разработки на продуктиве.

9. Расчет и анализ полученных данных по оценке качества образовательных услуг исследователем (субъектом анкетирования).

Анализ данных и расчет показателей производится с использованием системы автоматизации, например, системы управления сайтом 1С-Битрикс: осуществляется сбор полученных данных и результатов тестирования, производится анализ полученных результатов тестирования каждой группы потребителей.

Оценка результатов во многом зависит от выбранной оценочной базы. Например, анализ полученных результатов может осуществляться путем сопоставления целевых (плановых) и фактических значений показателей.

10. Разработка рекомендаций по повышению качества образовательных услуг.

Выполняется на основе полученных результатов для разработанных моделей анкет по каждому параметру (показателю). Результат – оценка выявления направлений развития, так называемых «узких» мест.

Важно отметить, что анкетирование – это сложный процесс, требующий правильной организации и анализа, а также корректной интерпретации результатов. При автоматизации процесса предполагается создание инструмента, который технически позволяет реализовать этот метод исследования с наименьшей трудоёмкостью. Однако для контроля интерпретации и разработки рекомендаций на основе полученного результата необходим специалист.

11. Планирование на краткосрочный период.

Результатом этапа является разработка мероприятий по повышению качества образовательных услуг, планирование новых значений показателей, реализация задач для обеспечения нужных значений и прочее.

Важно отметить, что при получении неудовлетворительного результата анкетирования путем новых итераций шагов 3-11 исследователь при помощи автоматизированной системы может уточнить или скорректировать данные в части предмета и объекта анкетирования в целях достижения нужного результата по улучшению качества услуг организации.

В систематизированном виде алгоритм оценки качества услуг отраслевого ВУЗа представлен на рисунке 1.

Концептуальный подход к оценке качества отраслевых образовательных услуг

Концептуальный подход к оценке качества образовательных услуг через анкетирование в отрасли целесообразно реализовать с учетом следующих факторов (рисунок 2):

- особенности реализации отраслевого образования;
- параметры оценки качества образовательных услуг;
- группы потребителей образовательных услуг.

Особенности реализации отраслевого образования. На текущий момент в нашей стране Минобрнауки России осуществляет функции по нормативно-правовому регулированию в сфере высшего образования, в том числе, отвечает за лицензирование и аккредитацию образовательных организаций, а также за подтверждение документов государственного образца, разрабатывает и реализует государственную политику в сфере высшего образования, издает нормативные акты, регламентирующие деятельность ВУЗов, развивает научные исследования и др. [6].

В сфере водного транспорта в части профессионального образования реализуют полномочия Минтранс России и Росморречфлот [7, 8].

Так, сейчас функционирует пять отраслевых образовательных организаций, *подведомственных Росморречфлоту*, которые функционируют в виде образовательных комплексов, включая в свой состав высшие учебные заведения и учреждения среднего профессионального образования [8, 9]:

- Государственный университет морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова;
- Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова;
- Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского;
- Волжский государственный университет водного транспорта;
- Сибирский государственный университет водного транспорта.

Кроме пяти указанных университетских комплексов, в 2016 году был создан еще и Российский университет транспорта (МИИТ), куда входит Академия водного транспорта, который непосредственно *подчиняется Минтрансу России*.

Основная цель указанных отраслевых образовательных организаций – это, в первую очередь, подготовка специалистов плавательных специальностей в соответствии с актуальными нормативными документами и реальными процессами в морской отрасли.

Функции Минтранса России и Росморречфлота в сфере профессионального образования показаны в таблице 1 [7, 8]. Таким образом, деятельность ВУЗов в области водного транспорта регламентируется со стороны двух министерств – это Минобрнауки России и Минтранс России, что обуславливает соответствие образовательного процесса не только общим, но и профессиональным стандартам.

Параметры (показатели) оценки качества образовательных услуг. Формируются на основе анализа Устава образовательной организации, программ и стандартов, документов Системы менеджмента качества, других нормативных и правоустанавливающих документов и анализа основных процессов образовательной организации путем формализации.

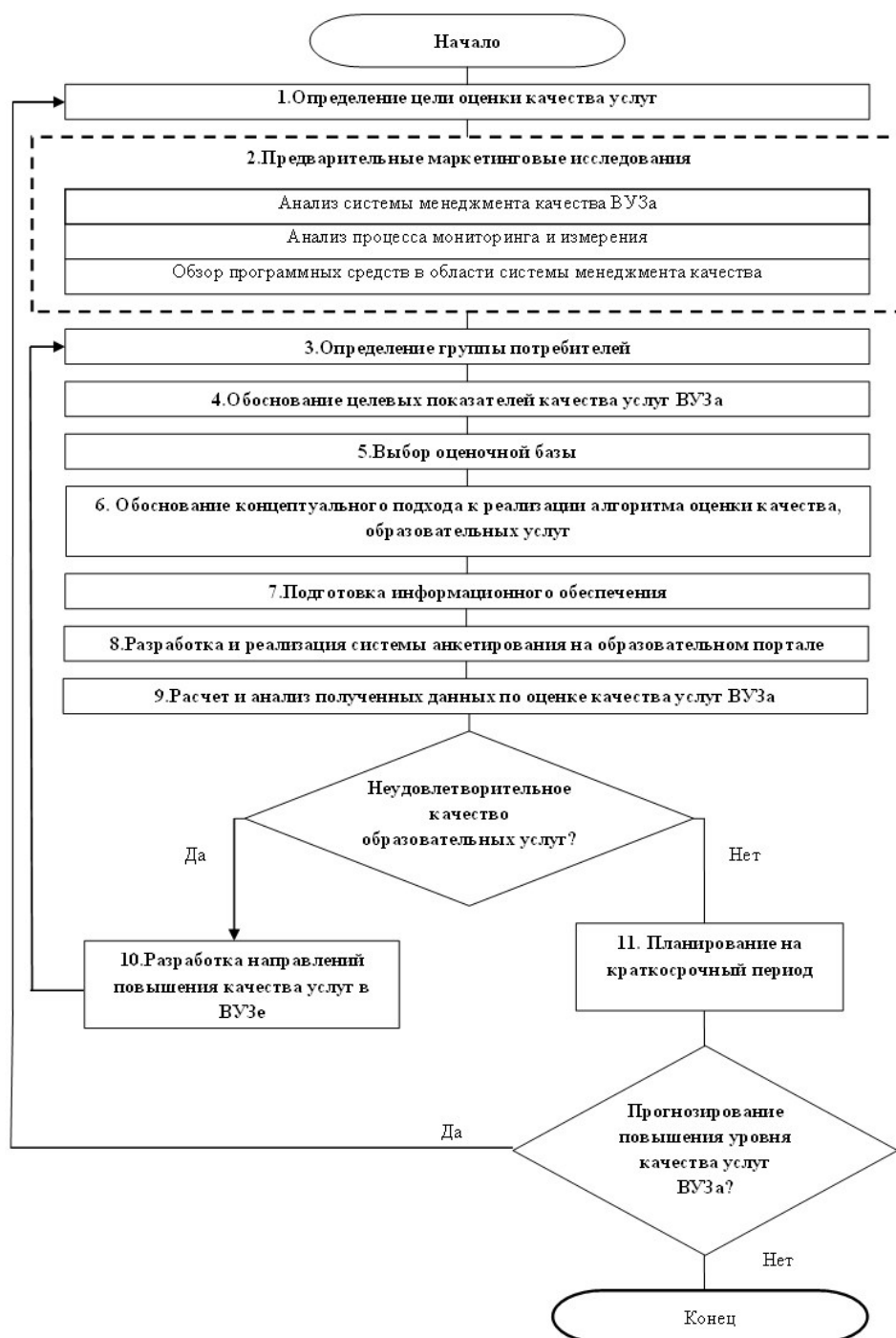


Рис. 1. Алгоритм оценки качества образовательных услуг в ВУЗе через анкетирование

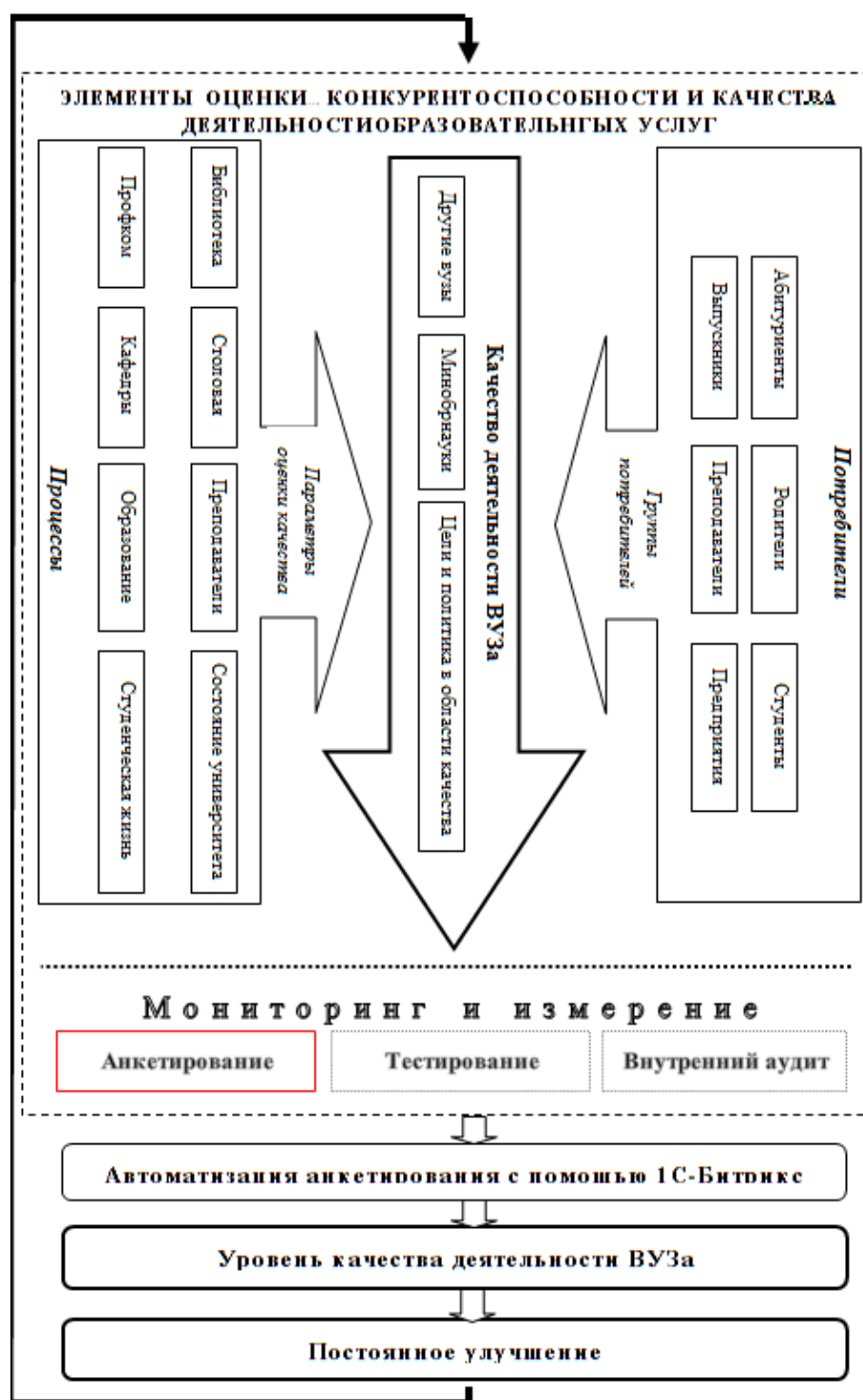


Рис. 2. Концептуальный подход к оценке качества отраслевых образовательных услуг через анкетирование

Таблица 1

Функции отраслевых ведомств в части реализации профессионального образования

Функции	Минтранс России	Росморречфлот
Утверждение образовательных программ в области подготовки специалистов членов экипажей судов в соответствии с международными требованиями	+	-
Установление квоты целевого приема для получения высшего образования на обучение за счет средств федерального бюджета	+	+
Определение образцов форменной одежды	+	-
Определение норм и порядка обеспечения форменной одеждой	+	
Определение норм и порядка обеспечения питанием обучающихся	+	+
Определение особенностей организации и осуществления теоретической, тренажерной и практической подготовки, а также методической деятельности по реализации образовательных программ	+	-
Установление порядка и сроков проведения аттестации кандидатов на должность руководителя образовательных организаций	+	+

В систематизированном виде для отраслевого университета набор параметров (показателей) оценки, а также предметом анкетирования могут быть [10-12].

- состояние материально-технической базы университета (включая тренажерные комплексы, лаборатории и др.);
- образовательные услуги (образовательные программы, направления подготовки и др.);
- преподаватели (профессорско-преподавательский состав);
- электронная информационно-образовательная среда (наличие, возможность удаленного доступа, дистанционное обучение и др.);
- организация практик и стажировок на отраслевых предприятиях (наличие, возможности международных стажировок, качество проведения и др.);
- научная жизнь (включая конференции, семинары, возможности публикации и др.);
- объекты спорта (спортивные залы и стадионы, бассейны и др.)
- питание (столовая, буфеты и др.);
- библиотечный комплекс;
- профком университета;
- общежития;
- здравпункты.

Среди перечисленных параметров для отраслевого образовательного учреждения на первый план выходят такие параметры, как: состояние материально-технической базы, реализуемые образовательные программы, возможность организация практик и стажировок на отраслевых предприятиях.

Группы потребителей образовательных услуг. Особенности реализации отраслевого образования обуславливают необходимость организации стажировок и практик для студентов ВУЗов, начиная со 3-го курса обучения, непосредственно на предприятиях отрасли, которые в перспективе после успешного прохождения становятся и работодателями для выпускников ВУЗов. Также следует отметить, что многие абитуриенты попадают в отраслевые ВУЗы из семьи отраслевиков, что уже заранее создает предпосылки для необходимости поддержания конкурентоспособного качества образования.

Немаловажны для отраслевой организации и так называемые «встречи выпускников», которые помогают ВУЗу получать регулярную обратную связь относительно спроса на свои услуги, а также мотивировать абитуриентов и студентов на достижения.

Таким образом, в целях всесторонней оценки автоматизация анкетирования в отраслевом ВУЗе может быть направлена на следующие группы потребителей:

- абитуриенты;
- родители;
- студенты;
- выпускники;
- преподаватели;
- представители отраслевых предприятий.

Преимущества автоматизации анкетирования в системе 1С-Битрикс

Модуль системы 1С-Битрикс «Опросы и голосования» позволяет организовывать различные голосования, опросы и публиковать их результаты на сайте. Пример интерфейса показан на рисунке 3.

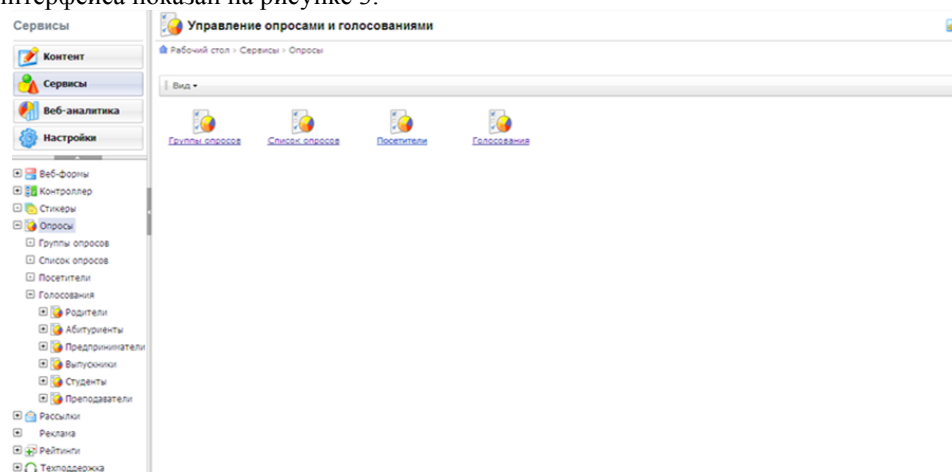


Рис. 3. Интерфейс модуля системы 1С-Битрикс «Опросы и голосования»

Преимуществами цифровизации анкетирования являются возможности обеспечить [13]:

- наличие шаблона любой анкеты для проведения анкетирования;
- сокращение времени на создание анкет и обработку результатов анкетирования;
- электронное хранение анкет и результатов анкетирования;
- доступность результатов анкетирования для всех потребителей;
- наглядность и точность проводимого анкетирования;
- проведение анкетирования в нужное время.
- Преимущества системы 1С-Битрикс представлены в таблице 2 [11-13].
- Использование механизма разграничения прав доступа дает возможность управлять доступом посетителей к участию в тех или иных опросах и голосованиях, а также к просмотру данных о ходе голосований и их результатов.
- Управление параметрами опросов и голосований позволяет: ограничивать период проведения опросов; предлагать на выбор несколько вариантов ответов на вопрос; предоставлять возможность

вводить собственные ответы на вопросы; управлять видом результирующих графиков и диаграмм и др.

Таблица 2

Преимущества использования системы 1С-Битрикс

Участники	Преимущества
Для ВУЗа	популяризация профессионального образования; возможность онлайн-поддержки образовательного процесса; повышение эффективности сотрудников и преподавателей; библиотека файлов и документов; гибкое распределение прав на доступ; создание рабочих и проектных групп по любым вопросам; отдельные форумы и блоги групп для студентов и сотрудников; возможность подключения библиотеки документов; система защиты от несанкционированного доступа; проведение анкетирования и др.
Для обучающихся и преподавателей	информация о расписании занятий; резервирование аудиторий; списки учащихся онлайн; создание электронных курсов; публикация учебных материалов, проведение опросов и тестирований; получение результатов работы от учащихся; тестирование знаний учащихся, проведение опросов. обратная связь по образовательному процессу; проведение анкетирования и др.
Для абитуриентов и их родителей	получение полной информации об учебном заведении; информация о преподавателях; совместная работа над проектами и задачами; публикация результатов работы и возможность обсуждения; библиотека файлов и документов; сервис обмена мгновенными сообщениями; проведение анкетирования и др.
Для выпускников и работодателей	получение полной информации об учебном заведении; информация о преподавателях; библиотека файлов и документов; сервис обмена мгновенными сообщениями; проведение анкетирования и др.

Заключение

Представленный концептуальный подход к автоматизации анкетирования ВУЗа водного транспорта в целях повышения качества и конкурентоспособности его услуг учитывает специфику отраслевой подготовки специалистов плавсостава, а именно:

- в части утверждения образовательных программ в области подготовки специалистов членов экипажей судов в соответствии с международными требованиями - осуществляется со стороны Минтранса России;
- в части определения условий осуществления теоретической, тренажерной и практической подготовки – осуществляется со стороны Минтранса России;
- в части реализации образовательных услуг: наличие подведомственной структуры и подчиненности - со стороны Минтранса России и Росморречфлота; наличие двух правоустанавливающих и контролирующих ведомств – Минобрнауки России и Минтранс России;
- в части определения норм питания – Минтранс России и Росморречфлот.

Перечисленные отраслевые особенности находят отражение на этапе обоснования параметров (показателей) оценки представленного алгоритма: это, в первую очередь,

реализация соответствующих образовательных программ, наличие требуемой нормативно-технической базы (включая наличие тренажеров, лабораторий, баз и т.д.); возможность организация практик и стажировок на отраслевых предприятиях.

С учетом реализации единых стандартов при подготовке специалистов водного транспорта, разработанный алгоритм является единым для всей системы отраслевых ВУЗов в области водного транспорта. Таким образом, авторами предлагается идея разработки единой системы анкетирования отраслевых ВУЗов.

Кроме того, например, ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова на сегодняшний день уже использует систему управления сайтом CMS 1С-Битрикс, возможности которого позволяют выстроить единую отраслевую систему анкетирования качества образовательных услуг.

Список литературы

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021666872 Российская Федерация. Единая автоматизированная информационная система оценки качества образования в Московской области: № 2021661364: заявл. 16.07.2021: опубл. 21.10.2021 / А. В. Будыльский, А. С. Дрокин, И. М. Дяковецкий [и др.]; заявитель Московская область, от имени которой выступает Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Академия социального управления». – EDN SVDIJE.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015619717 Российская Федерация. Система мониторинга деятельности образовательных учреждений: № 2015616700: заявл. 21.07.2015: опубл. 10.09.2015 / Е. Ю. Денисов, Ю. В. Ермолов, Б. Е. Левицкий; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кубанский государственный университет». – EDN EXWQTU
3. Т. П. Рубцова Автоматизация системы анкетирования студентов в высших учебных заведениях как инструмент управления качеством воспитательного процесса// Образование в современном мире: роль ВУЗов в социально-экономическом развитии региона: сб. научных трудов Международной научно-методической конференции, Самара, 18 марта 2014 года / ответственный редактор Т. И. Руднева. – Самара: Самарский государственный университет, 2014. – С. 14-16. – EDN TABSID.
4. Д. А. Суровцев. Автоматизированные информационные системы в развитии ВУЗа// Актуальные вопросы современной информатики: Материалы XI Всероссийской научно-практической конференции, Коломна, 01–15 апреля 2021 года. – Коломна: Государственное образовательное учреждение высшего образования Московской области "Государственный социально-гуманитарный университет", 2021. – С. 83-86. – EDN RRDIGH.
5. А. В. Швидченко, О. А. Гнедина Особенности разработки автоматизированной системы анкетирования студентов// Системный анализ, управление и обработка информации: Труды VII международного семинара, Ростов-на-Дону, 06–12 октября 2016 года. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2016. – С. 258-262. – EDN YTKAGF.
6. Официальный сайт Минобрнауки России. URL: <https://minobrnauki.gov.ru> (дата обращения 25.05.2025).
7. Официальный сайт Минтранса России. URL: <https://mintrans.gov.ru/> (дата обращения 25.05.2025).
8. Официальный сайт Росморречфлота. URL: <https://morflot.gov.ru/> (дата обращения 25.05.2025).
9. О. А. Казьмина, С. А. Казьмин, А. А. Холопов, А. А. Холопова Анализ системы информационного мониторинга показателей деятельности водного транспорта// Научные проблемы водного транспорта. – 2024. – № 81. – С. 129-143. – DOI 10.37890/jwt.vi81.539. – EDN QNTRAB.
10. Официальный сайт ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова. URL: <https://gumrf.ru> (дата обращения 25.05.2025).
11. Образовательный портал ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова. URL: <https://edu.gumrf.ru/> (дата обращения 25.05.2025).

12. О. А. Казмина, Н. Ю. Пышкина. Проектирование информационно-образовательной системы для специалистов водного транспорта// Цифровые трансформации в образовании (E-Digital Siberia'2021): Материалы V Международной научно-практической конференции, Новосибирск, 21–22 апреля 2021 года. – Новосибирск: Сибирский государственный университет путей сообщения, 2021. – С. 124-128. – EDN PWIPOF.
13. Образовательный сайт 1С: Битрикс. URL: <https://www.1c-bitrix.ru/> (дата обращения 25.05.2025).

References

1. Certificate of state registration of computer program No. 2021666872 Russian Federation. Unified automated information system for assessing the quality of education in the Moscow region № 2021661364: declared 16.07.2021: published 21.10.2021 / A. V. Budyl'skiy, A. S. Drokin, I. M. Dyakovetskiy [et al.]; applicant Moscow Region, represented by the State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region "Academy of Social Management". – EDN SVDIJE.
2. Certificate of state registration of computer program No. 2015619717 Russian Federation. System for monitoring the activities of educational institutions: No. 2015616700: declared 21.07.2015: published 10.09.2015 / E. Yu. Denisov, Yu. V. Ermolov, B. E. Levitsky; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Kuban State University". – EDN EXWQTU
3. T. P. Rubtsova Automation of the student survey system in higher education institutions as a tool for managing the quality of the educational process // Education in the modern world: the role of universities in the socio-economic development of the region: collection of scientific papers of the International scientific and methodological conference, Samara, March 18, 2014. - Samara: Samara State University, 2014.
4. D. A. Surovtsev Automated information systems in the development of the university // Actual issues of modern computer science: Proceedings of the XI All-Russian scientific and practical conference, Kolomna, April 01-15, 2021. - Kolomna: State educational institution of higher education of the Moscow region "State Social and Humanitarian University", 2021. - P. 83-86. - EDN RRDIGH.
5. V. Shvidchenko, O. A. Gnedina Features of the development of an automated system for surveying students// System analysis, management and information processing: Proceedings of the VII international seminar, Rostov-on-Don, October 6–12, 2016. – Rostov-on-Don: Don State Technical University, 2016. – P. 258–262. – EDN YTKAGF.
6. Official website of the Ministry of Education and Science of Russia. URL: <https://minobrnauki.gov.ru> (date of access 05/25/2025).
7. Official website of the Ministry of Transport of Russia. URL: <https://mintrans.gov.ru/> (date of access 05/25/2025).
8. Official website of Rosmorrechflot. URL: <https://morflot.gov.ru/> (date of access 25.05.2025).
9. O. A. Kazmina, S. A. Kazmin, A. A. Kholopov, A. A. Kholopova Analysis of the information monitoring system of water transport performance indicators// Scientific problems of water transport. - 2024. - No. 81. - P. 129-143. - DOI 10.37890/jwt.vi81.539. - EDN QNTRAB.
10. Official website of the Admiral S. O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. URL: <https://gumrf.ru> (accessed 25.05.2025).
11. O. A. Kazmina, N. Yu. Pyshkina. Design of an information and educational system for water transport specialists// Digital transformations in education (E-Digital Siberia'2021): Proceedings of the V International scientific and practical conference, Novosibirsk, April 21-22, 2021. - Novosibirsk: Siberian State Transport University, 2021. - P. 124-128. - EDN PWIPOF.
12. Educational portal of the Admiral S. O. Makarov State University of Maritime and Inland Waters. URL: <https://edu.gumrf.ru/> (date of access 05/25/2025).
13. Educational portal of the State University of Maritime and Inland Shipping named after Adm. S. O. Makarov. URL: <https://www.1c-bitrix.ru/> (date of access 05/25/2025).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Казьмина Олеся Александровна, канд. экон. наук, доцент кафедры «Технологии и организация перевозок», Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, дом 5/7, e-mail: kazminaoa@gumrf.ru

Тарануха Светлана Николаевна, канд. техн. наук, доцент кафедры «Математического моделирования и прикладной информатики», Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, дом 5/7, e-mail: kaf_mathmod@gumrf.ru

Фомина Инга Константиновна, доцент кафедры «Математического моделирования и прикладной информатики», Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, дом 5/7, e-mail: kaf_mathmod@gumrf.ru

Olesya A. Kazmina, Ph.D. in Economics, Associate Professor of the Department of Transportation Technologies and Organization, Admiral S.O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 198035, St. Petersburg, Dvinskaya St., Building 5/7, e-mail: kazminaoa@gumrf.ru

Svetlana N. Taranukha, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Mathematical Modeling and Applied Informatics, Admiral S. O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 198035, St. Petersburg, Dvinskaya St., Building 5/7, e-mail: kaf_mathmod@gumrf.ru

Inga K. Fomina, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Mathematical Modeling and Applied Informatics, Admiral S. O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 198035, St. Petersburg, Dvinskaya St., Building 5/7, e-mail: kaf_mathmod@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 26.05.2025; опубликована онлайн 20.09.2025.
Received 26.05.2025; published online 20.09.2025.

УДК: 338.47

DOI: 10.37890/jwt.vi84.642

Проблемы и перспективы развития внутреннего водного транспорта в Европе

М.Л. Лучкова

ORCID: 0009-0002-2120-9340

И.Н. Лучков

ORCID: 0009-0005-2468-7235

Е.А. Седова

ORCID: 0009-0006-6092-7651

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

Аннотация. В мире насчитывается около 623 000 километров судоходных водных путей. Судоходные водные пути в Европе составляют 8% от мировой длины. Спрос на перевозки водным транспортом с каждым годом продолжает расти. Европа поставила цель к 2050 году перевести весь транспорт на экологическое топливо с нулевым показателем выбросов CO₂.

Внутренний водный транспорт является наиболее эффективным потребляя всего 17 % энергии, в сравнении с грузовиками. Развитие перевозок водным транспортом требует вложение капитала на создание соответствующей инфраструктуры. Внутренний водный транспорт, несмотря на его многочисленные экологические преимущества, не может обеспечить достаточный спрос в условиях конкуренции с другими видами внутреннего транспорта и требует большего политического внимания и государственной поддержки для своего будущего развития. Поддержание тесной связи между морскими портами и внутренними портами через все три основных вида транспорта имеет большое значение для бесперебойной работы портов. При управлении рисками в портах следует учитывать неопределённость, связанную с изменением климата. Необходимо создание интеллектуальной сети водных перевозок. Необходимо модернизировать речной флот с учетом освоения новых технологий.

Ключевые слова: экологическое топливо, речное судоходство, интермодальные перевозки, мультимодальность, модернизация, пространство данных, интеллектуальная сеть водных перевозок, автономные суда, интермодальные хабы

Problems and prospects for the development of inland water transport in Europe

Mariya. L. Luchkova

ORCID: 0009-0002-2120-9340

Ivan. N. Luchkov

ORCID: 0009-0005-2468-7235

Ekaterina. A. Sedova

ORCID: 0009-0006-6092-7651

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia.

Abstract. There are approximately 623,000 kilometers of navigable waterways in the world. Navigable waterways in Europe account for 8% of the world's length. The demand for water transport continues to grow every year. Europe has set a goal to convert all transport to environmentally friendly fuels with zero CO₂ emissions by 2050. Inland waterway transport is the most efficient, consuming only 17% of energy compared to trucks. The development of water transport requires investment in the creation of appropriate infrastructure. Inland

waterway transport, despite its many environmental benefits, cannot provide sufficient demand in the face of competition with other modes of inland transport and requires greater political attention and government support for its future development. Maintaining close connections between seaports and inland ports through all three main modes of transport is of great importance for the smooth operation of ports. When managing risks in ports, the uncertainty associated with climate change should be taken into account. It is necessary to create an intelligent water transport network. It is necessary to modernize the river fleet, taking into account the development of new technologies.

Keywords: environmentally friendly fuels, river shipping, intermodal transportation, multimodality, modernization, data space, intelligent water transportation network, autonomous vessels, intermodal hubs

Введение

Внутренний водный транспорт на протяжении веков и до настоящего времени остается важным звеном в транспортной отрасли, по внутренним водным путям перевозят все виды грузов, пассажиров. Большая часть населения мира проживает вблизи прибрежных районов, зачастую в отдаленных районах, на островах и полуостровах и по сей день единственным транспортом остаются водные переправы.

В мире насчитывается около 623 000 километров судоходных водных путей. Судоходные водные пути в Европе составляют 8% от мировой длины. Протяжённость внутренних водных путей Евросоюза составляет около 50 тыс. км. Помимо водной глади морей и океанов, большинство судоходных водных путей являются частью речных систем, то есть сетей рек и речных бассейнов, которые взаимосвязаны. Спрос на перевозки водным транспортом с каждым годом продолжает расти, глобализация мировой экономики ведет к многократному увеличению общего объема перевозимых товаров.

Европа стремится к 2050 году добиться нулевого показателя выбросов парниковых газов, перейдя полностью на экологический транспорт, в связи с чем планируется к 2030 году объём перевозок по внутренним водным путям и коротким морским маршрутам увеличить на 25%, а к 2050 году — на 50%.² Однако для реализации этих целей требуется глобальная модернизация водного транспорта и соответствующей инфраструктуры, что в свою очередь связано с рядом проблем: отсутствие должного финансирования, неэффективность логистических систем, проблемы организационного характера, несовершенство правового регулирования.

Обзор литературы

В рамках исследования были рассмотрены и проанализированы документы и научные статьи, описывающие проблемы развития внутреннего водного транспорта в современной Европе. В контексте доклада Международного транспортного форума анализируются возможности и проблемы, связанные с интеграцией внутренних водных путей в транспортные коридоры.

Сирил и другие (1) изучают проблемы развития внутренних портов, во времена растущей интеграции транспортных цепочек и видов транспорта внутренние порты могут играть ключевую роль в качестве интермодальных логистических узлов, решение проблем внутренних портов способствует повышению эффективности и устойчивости целых транспортных коридоров и даже логистических сетей.

² Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions. Sustainable and Smart Mobility Strategy – putting European transport on track for the future. // Brussels, 9.12.2020.

Адольф и другие (2) в рамках научной статьи описывают процесс эффективного планирования адаптации портов для смягчения последствий изменения климата.

В своем исследовании Парваси и другие (3) рассматривают экономическую составляющую соотношения автомобильного транспорта с внутренним водным транспортом с использованием автономных электрических судов RoRo. Беря за основу транспортный маршрут из Роттердама в Гент с временным интервалом в одну неделю и одинаковым количеством перевозимого груза.

В Европе существуют «белые книги»³, охватывающие различные аспекты транспортной интеграции, в том числе внутреннего водного транспорта, в рамках Трансевропейской транспортной сети (TEN-T). В этих документах признаётся потенциал внутреннего водного транспорта с точки зрения экономической эффективности, экологической устойчивости, энергоэффективности и уровня безопасности, а также высказывается поддержка его внедрения в грузовые перевозки внутри страны. Кроме того, такие инициативы, как NAIADES II и NAIADES III, являются примерами программ, реализуемых в европейских странах для активного содействия развитию внутреннего водного транспорта.

Обсуждение

В Европе внутренний водный транспорт имеет большое значение, поскольку 21 из 28 государств-членов имеют внутренние водные пути. Сеть преимущественно включает в себя коридор Рейн-Майн-Дунай, обеспечивающий связь между 15 европейскими странами. Однако 50% сети расположено в основном во Франции, Германии, Нидерландах и Бельгии.

Согласно Стратегии устойчивой и интеллектуальной мобильности Европейского союза, ожидается, что к 2030 году объём перевозок по внутренним водным путям и коротким морским маршрутам увеличится на 25%, а к 2050 году — на 50% по сравнению с уровнем 2015 года.

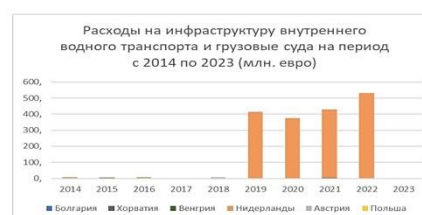
Европа поставила цель к 2050 году перевести весь транспорт на экологическое топливо с нулевым показателем выбросов CO₂. Сокращение выбросов парниковых газов остается серьезной проблемой, учитывая рост мирового населения и повышение спроса на энергию, выбросы загрязняющих веществ при внутренних водных перевозках в пять раз меньше, чем при автомобильных перевозках, и в шесть раз меньше, чем при железнодорожных перевозках. Это сложная задача, но в тоже время и многогранная, включающая в себя инновационное развитие многих отраслей промышленности, направленная на решение мировых экологических проблем, при этом Европейский союз выступает мировым лидером в вопросе поиска международных союзников для определения правил, в рамках решения экологической проблемы. Внутренний водный транспорт является наиболее эффективным на основных грузовых европейских маршрутах, потребляя всего 17 % энергии, необходимой грузовикам для перевозки тонны груза по дорогам, ввиду высокого трафика и аварийности.

Кроме того, водный транспорт остается одним из самых экологически чистых видов транспорта, обеспечивая безопасность грузов и людей, благоприятное воздействие на окружающую среду, поставку материалов, экономичную перевозку сыпучих грузов и взаимосвязь между морскими портами, внутренними речными портами и водными путями. Но, с другой стороны, развитие перевозок водным транспортом требует вложение капитала на создание соответствующей инфраструктуры.

³ White Paper on the Progress, Accomplishment and Future of Sustainable Inland Water Transport./ Geneva, 2020.

Однако рынок внутреннего водного транспорта остаётся недостаточно развитым и имеет значительный потенциал для роста и улучшения. Речной транспорт не используется в полной мере из-за неэффективности логистической системы, в первую очередь это зависит от значительных финансовых вложений в инфраструктуру, направленных на создание судоходной реки, рытье канала или строительство ряда шлюзов. Без обслуживания эти инфраструктуры приходят со временем в негодность. Без проведения дноуглубительных работ баржи должны перевозить более легкий груз. В виду низкой финансовой стабильности в обслуживании или модернизации инфраструктуры водные пути остаются недостаточно использованы⁴.

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Итого
Болгария	1,892	3,170	0,767		0,971	1,329	1,841	2,096			12,066
Хорватия								0,930	0,531		1,461
Венгрия	0,117	0,184	0,019	0,142							0,462
Нидерланды						412	374	427	532		1,745
Австрия	6		6		6	2					20
Польша	1,969	4,751	0,626								7,346



Внутренние водные пути обычно финансируются за счет поступления налоговых средств и сборов с пользователей, которые сильно различаются в зависимости от региона и местных тарифов. В некоторых регионах речной транспорт бесплатен, например, по Рейну с момента заключения международного соглашения в 1868 году. В Нидерландах и Фландрии сборы настолько низки, что их можно практически считать бесплатным проходом. Сбор за проход по водным артериям были привязаны к тоннажу, тонно-километрам, стоимости товаров и цене топлива (4).

Дефицит инвестиций в инфраструктуру для внутреннего водного транспорта, высокие затраты и обширная инфраструктура требуют долгосрочных стратегий для поддержания или улучшения инфраструктуры внутреннего водного транспорта, недостаточная пропускная способность шлюзов приводит к длительному ожиданию и скоплению барж в некоторых регионах.

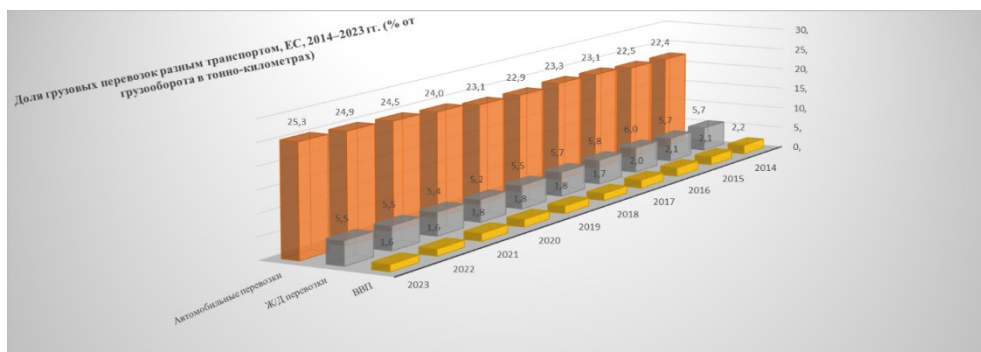
Для развития внутреннего водного транспорта требуется политическая заинтересованность, чтобы снизить неопределенность и создать систему стимулов или субсидий для преодоления сопротивления переходу на другие виды транспорта (5). С другой стороны, учитывая высокие затраты, связанные с эксплуатацией и инфраструктурой внутреннего водного транспорта, целесообразно привлечение частного сектора, в рамках внедрения государственно-частного партнерства и долгосрочных концессий. Внутренний водный транспорт, несмотря на его многочисленные экологические преимущества, не может обеспечить достаточный спрос в условиях конкуренции с другими видами внутреннего транспорта и требует большего политического внимания и государственной поддержки для своего будущего развития.

Сегодня отрасль внутреннего водного транспорта сталкивается с проблемами, связанными с нехваткой квалифицированной рабочей силы, старением экипажей судов в сочетании с недостаточной подготовкой и квалификацией, а также сокращением числа претендентов на получение морских образовательных программ. Развитие внутреннего водного транспорта предусматривает многочисленные преимущества, в том числе в сфере образования, инноваций, доступа к новым рынкам и технологиям, пассажирских перевозок, экономии средств на судоходстве и создания рабочих мест, особенно в Европе (12).

⁴ Eurostat. Retrieved from [2024] Expenditure on inland waterway transport infrastructure and freight vessels.

https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/iww_ec_invest/default/table?lang=en&category=iww

Недостатки развития речного пароходства: неоптимальное речное судоходство и длительные ожидания на мостах и шлюзах. Кроме того, низкая загрузка контейнеров и судов снижает эффективность логистической системы, что приводит к неоправданно большому количеству перевозимых контейнеров и совершенных рейсов. В результате интермодальные перевозки теряют конкурентоспособность по сравнению с другими видами транспорта (7). В период за последнее десятилетие доля интермодальных перевозок снизилась примерно на 14 %, достигнув 5,6 % от общего объема перевозок, в то время как доля автомобильных перевозок превысила 75 %.⁵ Однако, в Нидерландах доля грузовых перевозок по внутренним водным путям в 2023 году составила 40,9 %.⁶



Поддержание тесной связи между морскими портами и внутренними портами через все три основных вида транспорта имеет большое значение для бесперебойной работы морских портов. Для внутренних портов, в свою очередь, важно создать сеть внутренних портовых узлов, распределительных центров и сортировочных станций для предоставления улучшенного обслуживания их собственным внутренним районам (6). Однако многие внутренние порты сталкиваются с проблемами, связанными с доступностью дорог, железнодорожным сообщением и доступом к внутренним водным путям. В то время как железнодорожное сообщение ограничено длиной поезда, маневровыми зонами и недостаточным железнодорожным сообщением с морскими портами, внутренний водный транспорт требует оптимизированных глубин, включая высоту мостов, размеры шлюзов и пространство для разгрузки.

Пути решения

Для повышения конкурентоспособности внутреннего водного транспорта необходимо оптимизировать время работы шлюзов для сокращения времени в пути, минимизировать простои при понижении уровня воды и повысить коэффициент загрузки контейнеров для оптимизации пропускной способности. Одним из возможных решений для оптимизации загрузки контейнера является организация складирования груза для последующей возможности дозагрузки грузов с неполной загрузкой контейнера.

В настоящее время существует необходимость в создании интермодальных терминалов как расширенных объектов с возможностью соединения между собой (1). Это может решить проблемы, связанные с заторами на дорогах и в портах, нехваткой складских помещений и отсутствием физического пространства в некоторых регионах, где расширение портовых сооружений затруднено. Интермодальные

⁵ Eurostat. Retrieved from [2024, February]. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Electricity_prices_for_non-household_consumers_first_half_2022.png.

⁶ Eurostat. Data extracted in April 2025. SDG 9 - Industry, innovation and infrastructure. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=SDG_9_-_Industry_innovation_and_infrastructure.

перевозки представляют собой форму вертикального сотрудничества, характеризующуюся планированием по принципу «отправления-назначения», которое предполагает предварительное бронирование транспортных услуг, охватывающих весь транзитный маршрут, до отправки груза, преимущества как уменьшение заторов на дорогах и оптимизация использования пропускной способности, при этом необходимы затраты на координацию и управление. Мультиmodalность предполагает перевозку грузов как минимум двумя разными видами транспорта, при этом на решение о смене вида транспорта влияют такие факторы, как стоимость, время, гибкость, надёжность, а также характер и количество самого груза.

В настоящее время существует острая необходимость в модернизации речного флота и внедрении новых технологий, повышающих энергоэффективность и способствующих устойчивому развитию внутреннего водного транспорта (9). Помимо всего прочего необходимо внедрение информационных систем, которые собирают и обрабатывают данные для поддержки управления судами и дорожным движением, привлекательного портфеля услуг, адекватной мультиmodalной связанности и современных объектов и оборудования в порту. Для оптимизации процесса внутренние порты должны улучшить логистику терминала на месте и разработать новые решения для организации портового движения и перевалки грузов за счет лучшего управления имеющимися ресурсами, особенно с учетом еще более строгих требований со стороны грузоотправителей, экспедиторов и морских портов. Такое улучшение процесса охватывает физические и цифровые обновления и подразумевает развертывание инновационных технологий.

Повышение информированности о ходе перевозки для принятия решений и улучшение оценки времени прибытия на основные внутренние водные пути и терминалы. Такая неопределённость часто приводит к недостаточному использованию маршрутов по внутренним водным путям, тем самым ограничивая возможности синхронных перевозок. Совместимость означает способность различных систем беспрепятственно работать вместе, позволяя устройствам, приложениям или продуктам подключаться и обмениваться информацией согласованным образом, не требуя дополнительных усилий от конечных пользователей. Пространство данных — это децентрализованная «мягкая» инфраструктура, которая позволяет нескольким участникам находить и получать доступ к ресурсам данных на разных платформах, в то время как данные заинтересованных сторон остаются в источнике, а не централизуются в едином хранилище, что позволяет сохранить суверенитет данных (11).

Необходимо разработать новые решения для железнодорожного и водного транспорта на уровнях планирования и эксплуатации, которые удовлетворяют интересы заинтересованных сторон и жителей (8). Сокращение выбросов является ключевой задачей для внутренних портов, поскольку их территории находятся под особым контролем со стороны органов власти и общественности. Кроме того, портовым властям рекомендуется активно предотвращать загрязнение частицами, шумом и световыми выбросами и, таким образом, инвестировать в адекватные меры защиты, чтобы поддерживать и расширять приемлемость портовых операций. Для экологически чистых и удобных для городов логистических концепций внутренние порты должны проводить соответствующую политику землепользования и рассматривать обеспечение мест для потенциального использования как стратегическую задачу, поскольку районы с хорошим транспортным сообщением будут иметь приоритетное значение и будут очень дефицитными (14).

При управлении рисками в портах следует учитывать неопределённость, связанную с изменением климата. Недостаточно изучены вопросы систематической адаптации к последствиям изменения климата для портов, особенно в части снижения неопределенности при принятии решений, разработки эффективной государственной политики и передового опыта с участием различных заинтересованных сторон.

Сильный ветер, густой туман, дымка, метель, гроза, тайфун и так далее будут влиять на заход и выход судов в порту, разгрузку грузов, что приведёт к серьёзным проблемам с пропускной способностью порта и даже к его остановке. Порт не сможет работать в обычном режиме, проектировщикам портов необходимо учитывать динамику и стабильность в институциональной экономике, системах управления и географических условиях. Например, порт Роттердам в Нидерландах внедрил адаптивные меры, такие как плавучие конструкции и приподнятые дамбы, для борьбы с повышением уровня моря и экстремальными погодными условиями (2).

Европейский союз характеризует сети внутренних водных путей как более безопасную и менее перегруженную альтернативу автомобильному транспорту, способную обслуживать различные транспортные услуги, включая линейные, навалочные и роллер-офф (RoRo). В своем исследовании Парваси и другие рассматривают экономическую составляющую соотношения автомобильного транспорта с внутренним водным транспортом с использованием автономных электрических судов RoRo (3). Беря за основу транспортный маршрут из Роттердама в Гент с временным интервалом в одну неделю и одинаковым количеством перевозимого груза. Соотношение перевозок внутренним водным транспортом к автомобильному составило 3 судна к 36 грузовым автомобилям при непрерывной работе грузовиков. Конечно, себестоимость грузового автомобиля в десятки раз ниже стоимости водного судна, однако в рамках исследования учитывались все составляющие. Операционные расходы и амортизация судна выходит ниже, чем содержание целого грузового автопарка, при этом загрязнение окружающей среды при воздействии такого большого количества грузовых автомобилей существенно выше, чем при использовании электрических судов, а человеческий потенциал при этом на внутреннем водном транспорте ниже.

Необходимо создание интеллектуальной сети водных перевозок с использованием автономных судов внутреннего плавания для интеллектуального судоходства (13). Соблюдение курса и маневрирование важны на внутренних водных путях из-за ограниченного пространства рек и каналов. С помощью судов RoRo колесные грузы можно легко доставлять на борт с помощью встроенных пандусов, что устраняет необходимость в дополнительных погрузочно-разгрузочных работах. Кроме того, внедрение автономных судов на электрической тяге может привести к сокращению операционных расходов на 45 %, при этом прибыльность ожидается примерно через 3,5 года. Выбросы сократятся более чем на 60 %, и к 2030 году выбросы CO₂ за цикл сократятся примерно на 77 000 тонн, что соответствует транспортной и экологической политике Европейского союза.

Заключение

В рамках исследования затронуты вопросы перехода внутреннего водного транспорта на экологическое топливо с нулевым показателем выбросов CO₂. Отмечено, что решение данной задачи имеет связь с многими отраслями промышленности.

Также затронуты вопросы неэффективности логистической системы внутренних водных путей, недостаточно развитой портовой инфраструктуры, нехватки квалифицированных кадров, недостаточности бюджетных инвестиций и налоговых сборов за проход по тем или иным акваториям европейских рек. Отмечено на необходимость большего внимания со стороны властей на совершенствование нормативной базы по системе субсидирования, развития государственного-частного партнерства и долгосрочных концессий, создания условий для прохода судов большей грузоподъемности и пассажироместимости.

Решением сложившейся ситуации в Европе и перезагрузки судоходства по внутренним водным путям станет создание сети внутренних портовых узлов, распределительных центров и сортировочных станций для предоставления

улучшенного обслуживания их собственным внутренним районам (интермодальные хабы).

В рамках создания интермодальных хабов необходимо оптимизировать пропускную способность контейнеров, перестроить систему хранения грузов в портах, автоматизацией ряда процессов по перегрузке грузов и управления флотом, синхронизировать и оптимизировать железнодорожный и автомобильный транспорт с портовой инфраструктурой и интермодальными хабами.

Список литературы

1. Cyril Alias, Edwin van Hassel, Dieter Gründer, Jonas zum Felde, Lixon Samuel. Изучение проблем европейских внутренних портов: многогранный подход. // Процедура Транспортного исследования, 2023, Том 72, стр. 704-711. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.458>.
2. Adolf K.Y. NG, Mark C.P. POO, Tianni WANG, Austin BECKER, Yui-yip LAU, Tina Ziting XU, Zaili YANG. Анализ стратегий адаптации к изменению климата и планирования портов с различных теоретических точек зрения. // Экономика и управление транспортом, 2025, Том 3, стр. 46-56. <https://doi.org/10.1016/j.team.2025.01.001>.
3. Seyed Parsa Parvasi, Harilaos N. Psaraftis, Sotirios Michailidis, Kristoffer Kloch, Stefan Krause, Espen Tangstad, Odd Erik Mørkrid. Анализ конкурентоспособности внутренних водных путей с использованием автономных электрических судов RoRo: пример маршрута из Роттердама в Гент. // Тематические исследования по транспортной политике, 2025, Том 20. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2025.101406>.
4. Takman, J. Gonzalez-Aregall, M. A review of public policy instruments to promote freight modal shift in Europe: Evidence from evaluations. // VTI Working Paper 2021:6. Swedish National Road and Transport Research Institute. 52 стр.
5. Lingyu Zhang, Oliver Schacht, Qing Liu, Adolf K.Y. Ng. Прогнозирование спроса на перевозки по внутренним водным путям с помощью динамической пространственно-временной сети с несколькими уровнями внимания. // Транспортные исследования. Часть E: Обзор логистики и транспорта, 2025, Том 199. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104139>.
6. Мирс, Д., Махарис, К. Приоритизация при смене вида транспорта: определение наиболее подходящих для региона грузопотоков. // Eur. Transp. Res. Rev. 7, 23, 2015. <https://doi.org/10.1007/s12544-015-0172-6>.
7. Felipe Bedoya-Maya, Peter Shobayo, Adrien Nicolet, Eva Christopoulou, Ivo Majoer, Edwin van Hassel, Thierry Vanelsländer. Консолидация грузов при контейнерных перевозках из порта во внутренние районы: пространственная экономическая оценка для внутренних водных путей. // Исследования в области транспортного бизнеса и менеджмента, 2025, Том 59. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2024.101254>.
8. Бейер, А. Внутренние водные пути, транспортные коридоры и городские набережные. // Доклад Международного транспортного форума, № 2018/21, Издательство ОЭСР, Париж. <https://doi.org/10.1787/c78b9c58-en>.
9. Chengqian Zhang, Jonas W. Ringsberg, Fabian Thies. Разработка модели характеристик судна для оценки мощности судов внутреннего плавания. // Океанотехника, 2023, Том 287, часть 1. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115731>.
10. Enezy, O. A. Van Hassel, E. Sys, C. Vanelsländer, T. Разработка модели расчёта затрат на внутреннее судоходство. // Исследования в области транспортного бизнеса и менеджмента 23. 2017, стр. 64–74. DOI:10.1016/j.rtbm.2017.02.006.
11. Juan Manuel Pulido, Ivan Cardenas, Valentin Carlan, Tom Bergmans, Thierry Vanelsländer. Содействие синхронному переводу посредством создания единого информационного пространства для внутреннего водного транспорта. // Транспортное Машиностроение, 2025, Том 21. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2025.100351>.
12. Natalia Calderón-Rivera, Inga Bartusevičienė, Fabio Ballini. Препятствия и решения для устойчивого развития внутреннего водного транспорта: обзор литературы. // Экономика и управление транспортом, 2024, Том 2, стр. 31-44. <https://doi.org/10.1016/j.team.2024.01.001>.
13. Joao L.D. Dantas, Gerasimos Theotokatos, Методика оценки экономической и экологической целесообразности использования автономных судов для каботажных

- перевозок // Океанотехника, 2023, Том 279, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114420>.
14. Bergqvist, Rickard & Monios, Jason, Зелёные порты: стратегии устойчивого развития внутреннего и морского транспорта // Elsevier, 2019. https://www.researchgate.net/publication/330620952_Green_Ports_Inland_and_Seaside_Sustainable_Transportation_Strategies.

References

1. Cyril Alias, Edwin van Hassel, Dieter Gründer, Jonas zum Felde, Lixon Samuel. Investigating into the challenges of European inland ports: A multifaceted approach // Transportation Research Procedia, 2023, Volume 72, pp. 704-711. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11458>.
2. Adolf K.Y. NG, Mark C.P. POO, Tianni WANG, Austin BECKER, Yui-yip LAU, Tina Ziting XU, Zaili YANG. Dissecting climate adaptation strategies and planning of ports from different theoretical angles. // Transport Economics and Management, 2025, Volume 3, pp. 46-56. <https://doi.org/10.1016/j.team.2025.01.001>.
3. Seyed Parsa Parvasi, Harilaos N. Psaraftis, Sotirios Michailidis, Kristoffer Kloch, Stefan Krause, Espen Tangstad, Odd Erik Mørkrid. Analyzing inland waterway competitiveness with electric autonomous RoRo vessels: A case study from Rotterdam to Ghent. // Case Studies on Transport Policy, 2025, Volume 20. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2025.101406>.
4. Takman, J. Gonzalez-Aregall, M. A review of public policy instruments to promote freight modal shift in Europe: Evidence from evaluations. // VTI Working Paper 2021:6. Swedish National Road and Transport Research Institute. 52 p.
5. Lingyu Zhang, Oliver Schacht, Qing Liu, Adolf K.Y. Ng. Predicting inland waterway freight demand with a dynamic spatio-temporal graph attention-based multi attention network. // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2025, Volume 199. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104139>
6. Meers, D., Macharis, C. Prioritization in modal shift: determining a region's most suitable freight flows. // Eur. Transp. Res. 2015, Rev. 7, 23. <https://doi.org/10.1007/s12544-015-0172-6>.
7. Felipe Bedoya-Maya, Peter Shobayo, Adrien Nicolet, Eva Christopoulou, Ivo Majoor, Edwin van Hassel, Thierry Vanelslander. Cargo consolidation in port-hinterland container transport: A spatial economic assessment for inland waterways. // Research in Transportation Business & Management, 2025, Volume 59. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2024.101254>.
8. Beyer, A. Inland Waterways, Transport Corridors and Urban Waterfronts. // International Transport Forum Discussion Papers, No. 2018/21, OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/c78b9c58-en>.
9. Chengqian Zhang, Jonas W. Ringsberg, Fabian Thies. Development of a ship performance model for power estimation of inland waterway vessels. // Ocean Engineering, 2023, Volume 287, Part 1. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115731>.
10. Enezy, O. A. Van Hassel, E. Sys, C. Vanelslander, T. Developing a cost calculation model for inland navigation. // Research in Transportation Business & Management 23. 2017, pp. 64–74. https://www.researchgate.net/publication/313884573Developing_a_cost_calculation_model_for_inland_navigation.
11. Juan Manuel Pulido, Ivan Cardenas, Valentin Carlan, Tom Bergmans, Thierry Vanelslander. Contributing to synchromodality through the implementation of a federated data space in Inland Waterway Transport. // Transportation Engineering, 2025, Volume 21, <https://doi.org/10.1016/j.treng.2025.100351>.
12. Natalia Calderón-Rivera, Inga Bartusevičienė, Fabio Ballini. Barriers and solutions for sustainable development of inland waterway transport: A literature review. // Transport Economics and Management, 2024, Volume 2, pp. 31-44. <https://doi.org/10.1016/j.team.2024.01.001>.
13. Joao L.D. Dantas, Gerasimos Theotokatos, A framework for the economic-environmental feasibility assessment of short-sea shipping autonomous vessels // Ocean Engineering, 2023, Volume 279, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114420>.

14. Bergqvist, Rickard & Monios, Jason, Green Ports; Inland and Seaside Sustainable Transportation Strategies // Elsevier, 2019.
https://www.researchgate.net/publication/330620952_Green_Ports_Inland_and_Seaside_Sustainable_Transportation_Strategies.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Лучкова Мария Леонидовна, аспирант, кафедра экономики и менеджмента, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: mariya.harlanova@mail.ru

Лучков Иван Николаевич, канд. техн. наук, доцент кафедры проектирования и технологии постройки судов, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: luchnikc@ya.ru

Седова Екатерина Анатольевна, канд. психол. наук, доцент кафедры иностранных языков и конвенционной подготовки, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

Mariya L. Luchkova, graduate student, Department of Economics and Management, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Ivan N. Luchkov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Design and Shipbuilding Technology, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Ekaterina A. Sedova, Ph.D. in Psychological Sciences, Associate Professor of the Department of Foreign Languages and Conventional Training, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 15.05.2025; опубликована онлайн 20.09.2025.
Received 15.05.2025; published online 20.09.2025.

УДК 656.6

DOI: 10.37890/jwt.vi64.634

Современное состояние научно-методического обеспечения и практические вопросы развития транспортно-логистического обслуживания внешнеторговых грузов в портах МТК «Север-Юг»

Хусейн Карам

ORCID: 0009-0006-0259-7420

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

Аннотация. В статье рассматриваются современное состояние научно-методического обеспечения и практические вопросы развития транспортно-логистического обслуживания внешнеторговых грузов в портах международно-транспортного коридора МТК «Север-Юг».

Научно-методическое обеспечение играет решающую роль в оптимизации транспортно-логистических процессов. Актуальность исследований в этой области обусловлена необходимостью адаптации типовых транспортно-логистических процессов к современным условиям работы флота и портов в системе международных перевозок. Известные подходы и методики, разработанные учеными и специалистами, направлены на улучшение логистического управления потоками внешнеторговых грузов, на повышение прозрачности операций и сокращение времени обработки флота в портах.

Целью работы является изучение теоретических основ и дальнейшее развитие научно-методических и практических положений в сфере транспортно-логистического обслуживания внешнеторговых грузов в портах МТК «Север-Юг».

Результаты исследования. Анализируются концептуальные подходы и методы, применяемые для повышения эффективности транспортно-логистических операций, в том числе через совершенствование организации грузопотоков, технологических процедур обработки грузов и судов. Исследование направлено прежде всего на разработку новых технологических и организационных решений, которые могли бы способствовать более тесной интеграции видов транспорта и транспортных сетей, обеспечивая таким образом устойчивое развитие портовой индустрии в рамках МТК «Север-Юг». Особое внимание уделяется также управленческим решениям, способным улучшить координацию между участниками транспортно логистической цепочки.

Ключевые слова: Транспортные коридоры, логистика, порты обслуживание, транспортная сеть, развитие

The current state of scientific and methodological support and practical issues of the development of transport and logistics services for foreign trade goods in the ports of the North-South ITC

Karam Husein

ORCID: 0009-0006-0259-7420

Volga state university of water transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article examines the current state of scientific and methodological support and practical issues of the development of transport and logistics services for foreign trade goods in the ports of the international transport corridor of the North-South International Transport Corridor.

Scientific and methodological support plays a crucial role in optimizing transport and logistics processes. The relevance of research in this area is due to the need to adapt typical transport and logistics processes to modern conditions of operation of the fleet and ports in the international transportation system. Well-known approaches and techniques developed by scientists and specialists are aimed at improving the logistics management of foreign trade cargo flows, increasing transparency of operations and reducing fleet processing time in ports.

The purpose of the work is to study the theoretical foundations and further development of scientific, methodological and practical provisions in the field of transport and logistics services for foreign trade goods in the ports of the North-South MTC.

The results of the study. The conceptual approaches and methods used to improve the efficiency of transport and logistics operations are analyzed, including through improving the organization of cargo flows, technological procedures for handling cargo and ships. The research is primarily aimed at developing new technological and organizational solutions that could contribute to closer integration of modes of transport and transport networks, thus ensuring the sustainable development of the port industry within the framework of the North-South ITC. Special attention is also paid to management solutions that can improve coordination between participants in the transport and logistics chain.

Keywords: Transport corridors, logistics, ports, maintenance, transport network, development.

Введение

МТК «Север-Юг» - мультимодальный транспортный путь, представляющий собой международный проект, основными участниками которого являются такие страны, как: Россия, Индия, Иран и Казахстан. Однако развитие портового сегмента этого коридора сталкивается с целым рядом проблем, связанных с необходимостью совершенствования транспортно-логистического обслуживания (далее ТЛО). Основные трудности заключаются в устаревшей инфраструктуре, неоптимизированных логистических процессах (далее ЛП) и недостаточном уровне их автоматизации и цифровизации. Чтобы повысить конкурентоспособность портов МТК «Север-Юг» и ускорить обработку грузов, требуется комплексный подход к развитию научно-методического обеспечения, включающему разработку и внедрение инновационных решений. Это позволит не только улучшить качество услуг, но и существенно сократить время и издержки на доставку товаров по данному направлению [1].

Актуальность

Формирование МТК и правильное построение научно-методического обеспечения для их организованной работы считается главным методом укрепления роли государства, а также сохранения его устойчивости на международной арене. Начало специальной военной операции (СВО) в 2022 году послужило толчком к возникновению постоянного санкционного давления на Российскую Федерацию, что также существенно отразилось на логистических возможностях страны. К примеру, с этого периода времени экономические субъекты РФ оказались в трудном положении при выполнении транзитных перевозок с использованием возможностей территории России, что негативно сказалось на работе традиционных маршрутов МТК «Север-Юг». В результате России пришлось разорвать крупные договоры с многими судоходными компаниями мира. В связи с этим, создание новых маршрутов МТК, а также налаживание новых экономических связей, в том числе со странами Центральной и Южной Азии становится важным для компенсации экономических потерь от санкций коллективного запада [2].

Целью работы является изучение состояния и совершенствование научно-методического обеспечения и практического развития транспортно-логистического обслуживания внешнеторговых грузов в портах МТК «Север-Юг».

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ научно-методической исследований отечественных и зарубежных авторов в части технических, технологических, организационных, информационных и экономических аспектов проблемы.
2. Выделить актуальные научно-методические вопросы технического, организационного и информационного обеспечения дальнейшего развития ТЛО внешнеторговых перевозок в отечественных портах МТК «Север-Юг».
3. Обосновать необходимость новых подходов к научно-методическому обеспечению развития ЛП в международных портах МТК «Север-Юг».

Материалы и методы исследования

В процессе работы применялись такие общенаучные методы, как теоретико-методологический, статистический, графический анализ, наблюдение, сравнение, синтез, аналогия и обобщение.

Результаты исследования

Перевозка внешнеторговых грузов по МТК «Север-Юг» подразумевает использование потенциала морского транспорта, российских (Астрахань, Оля, Махачкала) и иранских (Бендер Энзели, Ноушехр, Амирабад) портов с использованием сухопутных маршрутов (автомобильного и железнодорожного транспорта) и выходом в Индийский океан через крупнейший в Индии порт Джавахарлала Неру в регионе Мумбаи в западном штате Махараштра [3].

Все это позволяет сократить расстояние перевозки и достичь значительных преимуществ по времени доставки внешнеторговых товаров против известного маршрута через Суэцкий канал (рис.1).



Рис. 1. Маршрут МТК «Север-Юг» и маршрут через Суэцкий канал [1]

В современных экономических реалиях интеграция цепей поставок трансформировалась из операционного инструмента в ключевую конкурентную стратегию. Оптимизация логистических процессов через выстраивание партнерских отношений с лидерами отрасли позволяет компаниям достигать тройного эффекта: сокращение сроков доставки, снижение затрат и повышение качества продукции - критически важных параметров в конкурентной борьбе.[2]

Основными задачами научных исследований в сфере транспортной и портовой логистики являются:

- выявление проблем развития логистических процессов в области интегрированного планирования и управления цепями поставок учетом потенциала ключевых портов.
- интегрированное планирование взаимодействия видов транспорта в перевалочных портах.
- комплексный подход к моделированию и интегрированному планированию транспортно-логистических процессов в портах.

По перечисленным задачам научных исследований в области транспортной и портовой логистики авторами изучен ряд актуальных публикаций.[4,6,8,10,12].

На основе их анализа установлены следующие научно методические и практические аспекты, определяющие проблемные области в сфере логистики:

1. Экономические.

В условиях ужесточающихся санкций, нестабильной геополитической конъюнктуры и кардинальной трансформации экономических отношений (от партнёрства прошлых лет к текущей конфронтации) транспортная логистика выходит на первый план как стратегически важная отрасль. Перед ней встают новые вызовы: необходимость оперативной адаптации к изменяющимся грузопотокам, нейтрализация дискриминационных ограничений, укрепление позиций отечественных перевозчиков, а также модернизация логистических цепочек без потери их устойчивости и эффективности через порты МТК.

2. Технологические.

Современные исследования в данной области концентрируются на оптимизации портовой инфраструктуры и расширении функциональных возможностей речного и морского транспорта, в частности для транспортировки негабаритных конструкций, тяжеловесного оборудования и контейнерных отправок.

3. Технические.

Современные логистические процессы, включая их организационно-технологические аспекты, детерминированы уровнем развития технической базы и инфраструктуры. Оптимизация транспортных операций предполагает создание инновационных технических решений для логистических систем, соответствующих актуальным стандартам производительности и надежности - от погрузочной техники до интеллектуальных складских комплексов.

4. Организационные.

Методология логистики находит практическое применение при проектировании эффективных моделей взаимодействия участников транспортно-логистических цепочек. Она позволяет разрабатывать оптимальные организационные структуры и механизмы управления инновационными системами доставки, где особую значимость приобретает создание нормативно-правовой базы межведомственного сотрудничества в портовых грузоперевалочных узлах.

5. Информационные.

Эволюция роли информационного обеспечения:

- Было: составная часть организационного управления
- Стало: самостоятельное направление исследований и разработок

- Требование: обязательное цифровое сопровождение для всех логистических операций.[4]

Исследователи [5], также подчеркивают важность этих аспектов, указывая на тесную связь между активным участием страны в международных ЛП и создании специальных зон ТЛО. Авторы отмечают, что в настоящее время имеются проблемы, связанные с необходимостью совершенствования научно-методического обеспечения логистических процессов в портах в рамках функционирования МТК «Север-Юг» и др. Основные моменты, на которые они обращают внимание, включают:

1. Однонаправленность перевозок: Многие международные и межрегиональные транспортные потоки осуществляются преимущественно в одном направлении, что создает определенные трудности и возможности для логистической оптимизации.

2. Инфраструктурное обеспечение: Рассмотрение вопросов, связанных с развитием цифровой платформы МТК, является ключевым условием для улучшения эффективности транзитных и внешнеторговых доставок.

3. Формирование центров ТЛО и мультимодальных терминалов: Стратегическое планирование и развитие сети опорных логистических узлов имеют особое значение для поддержки и расширения функций МТК.

Эти аспекты (указываемые в [5]) требуют глубокого анализа и стратегического планирования, чтобы максимально использовать потенциал транспортных коридоров для ускорения экономического развития России.

Исследование [6] подробно освещает ключевые элементы развития МТК в РФ, с особым акцентом на методическое сопровождение их функционирования. Важным аспектом работы является анализ транспортно-логистического потенциала коридора «Север-Юг». Этот проект представляет собой значительный шаг в укреплении транзитных связей между Европой и Азией, что, по мнению автора, способствует усилению стратегического и политического влияния государств участвующих в работе транспортных коридоров

Модернизация технического, технологического, организационного и информационного обеспечения МТК «Север-Юг» обещает ряд значительных экономических преимуществ:

1. Сокращение времени доставки грузов, что приведет к уменьшению транспортных расходов.

2. Усиление и стабилизация рынка транзитных перевозок благодаря улучшению логистических процессов и связей.

3. Привлечение инвестиций от иранских и индийских бизнесменов, заинтересованных в совместных проектах в рамках коридора.

Многоаспектное развитие МТК «Север-Юг» начало приобретать новые очертания в 2017 году, когда проект получил значительные инвестиции для расширения и модернизации. До этого времени он функционировал как совокупность несвязанных между собой участков, что существенно ограничивало его эффективность. Первые шаги, которые побудили к трансформации ЛП в данном направлении:

1. Инвестиционные вливания: Азербайджан направил 0,5 млрд долларов на строительство железнодорожной ветки Астара – Казвин.

2. Развитие инфраструктуры: России инвестировало 1 млрд. долларов в улучшение железнодорожной сети Ирана.

Эти шаги предполагались как начало большого пути к созданию единого и эффективного транспортного потока, который бы объединил различные регионы и способствовал быстрому перемещению грузов. Развитие проекта, однако, столкнулось с непредвиденными трудностями. В период президентства Дональда Трампа, США ввели экономические санкции против Ирана, что создало серьезные препятствия для дальнейшей реализации проекта. России оказалось вынужденным

приостановить инвестиционные работы, что замедлило процесс интеграции и улучшения транспортной сети. Таким образом, планы по созданию единого МТК «Север-Юг» были временно заморожены, а потенциал проекта остался не полностью реализованным. Несмотря на начальные успехи и значительные инвестиции, политические факторы внесли коррективы в развитие ТЛО, подчеркнув важность стабильного международного сотрудничества для успешной реализации крупномасштабных проектов. В будущем, возобновление работ и устранение препятствий могут позволить проекту достичь задуманных целей и значительно улучшить транспортные связи между странами [7].

Исследователи в работе [8], провели глубокий анализ функционирования транспортной сети МТК «Север-Юг» и логистического научно-методического обеспечения процесса транспортировок, акцентируя внимание на необходимости модернизации процессов ТЛО. Авторы отмечали, что российские и иранские портовые узлы на Каспийском море играют ключевую роль в ЛП в данном регионе. Помимо этого, они обращают внимание на порты, расположенные в бассейне Индийского океана, описывая их как важные точки транзита и перевалки грузов. В исследовании также поднимается вопрос о маршрутах МТК. Описываются различные варианты путей, которые могут оптимизировать и ускорить транспортировку между странами-участниками. Авторы предлагают детальный анализ инфраструктуры перспективных стран-участников проекта, таких как Пакистан и Мьянма, подчеркивая их стратегическое значение и возможности для развития. Важной частью работы является обсуждение необходимости создания взаимосвязанной системы ТЛО. Исследователи подчеркивают, что для эффективного функционирования МТК «Север-Юг» требуется интеграция существующих элементов в единую сеть. Это предполагает разработку и реализацию высококачественной транспортной и терминально-логистической инфраструктуры. Авторы рекомендуют разработку новых технологических решений для портов и транспортных коридоров, а также улучшение управленческих и операционных процессов, что сможет значительно повысить эффективность и безопасность транспортных потоков [8].

Похожие выводы делают в своих работах зарубежные авторы, которые подчеркивают важность привлечения к перевозкам по МТК небольших компаний, разработку новых методик их работы. [9-13].

В 2020 году Россия предприняла значительные попытки развития МТК, особенно акцентировав внимание Переориентация на иранское направление стала ответом на системные вызовы глобальной логистики:

1. Неустойчивость ценовых показателей фрахта
2. Геополитические риски ключевых морских артерий

Выбор в пользу коридора "Север-Юг" обусловлен его конкурентными преимуществами:

- Стабильные тарифные условия
- Альтернативность существующим маршрутам

Критическим фактором стало блокирование Суэцкого канала на 6 дней (рис. 2).

В ответ на эти вызовы Россия активизировала свои усилия по совершенствованию логистического обеспечения функционирования МТК «Север-Юг»:

- Были проанализированы и оптимизированы существующие транспортные маршруты.
- Было увеличено инвестирование в инфраструктуру коридора.
- Были укреплены торговые связи с Ираном в качестве стратегического партнера.



Рис. 2. Котировки SCFI* и ERAI** и объем железнодорожных контейнерных перевозок в сообщении Европа – Китай/Китай – Европа (Источники: интернет-ресурс – Shanghai Containerised Freight Index, Eurasian Rail Alliance Index)

Обсуждение

В современной системе товародвижения ключевое значение имеют региональные и межрегиональные логистические комплексы. Эти объекты играют важную роль в организации перевозок различных товаров, обеспечивая их своевременную и эффективную доставку. Основными аспектами, которые необходимо рассматривать при планировании перевозок через эти узлы и модернизации научно-методического обеспечения, являются:

- Местоположение логистических комплексов: выбор стратегически выгодных точек, транспортно-логистических центров для уменьшения времени и стоимости доставки товаров.
- Возможности для складирования и переработки товаров: наличие достаточных площадей и технологий для обработки грузов.
- Удобство транспортного доступа: наличие разветвленной транспортной сети, включая автомобильные и железнодорожные подходы.

Важно также учитывать, что для повышения общей эффективности и устойчивости транспортных и логистических услуг в портах (МТК) «Север-Юг» необходимо:

1. Мониторинг производительности труда.
2. Внедрение цифровых платформ для обмена информацией в режиме реального времени.
3. Укрепление координации и сотрудничества между участвующими странами, их компаниями.
4. Обеспечение экологической устойчивости и соответствия требованиям конкурентоспособности.
5. Наращивание кадрового потенциала и развитие людских ресурсов.
6. Улучшение портовой инфраструктуры.

Выводы

МТК «Север-Юг» привлекает внимание не только благодаря своему географическому положению, но и уникальной возможности стать альтернативой традиционным маршрутам, таким как Суэцкий канал и др. В последнее время

деятельность дружественных государств и компании в рамках (МТК) «Север-Юг» значительно активизировалась, несмотря на сложные международные отношения и беспрецедентные санкции со стороны коллективного Запада. Это свидетельствует о стремлении РФ и других стран к укреплению экономических связей и снижению уровня зависимости от западных логистических и транспортных сетей за счет повышения эффективности функционирования МТК «Север-Юг».

Заключение

В заключении следует подчеркнуть, что модернизация технологических, организационных и инфраструктурных компонентов транспортно-логистической системы в рамках международного коридора «Север-Юг» приобретает стратегическую важность для повышения общей эффективности и конкурентоспособности международных перевозок по маршрутам транспортного коридора. Успешная реализация этих составляющих принесет пользу не только портам МТК «Север-Юг», но и будет способствовать росту глобальной торговли всей инфраструктурной логистической сети товародвижения стран участниц глобального товарообмена.

Список литературы

1. Хусейн К. Современное состояние и научно-практические задачи развития транспортно-логистических услуг для внешней торговли в портах МТК Север-Юг / К. Хусейн, В. Н. Костров // Транспорт. Горизонты развития: Материалы 2-го Международного научно-промышленного форума, Нижний Новгород, 07-09 июня 2022 г. Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта. - 2022. - с. 23.
2. Официальный сайт Министерства транспорта Российской Федерации // URL: <https://mintrans.gov.ru>.
3. Суэцкий канал vs (Север-Юг). Россия, Индия и Иран создадут новый грузовой коридор. (дата обращения 23.05.2022)
4. О.Л. Домнина, В.Н. Костров, А.О. Ничипорук Современное состояние, проблемы и основные направления развития логистики на водном транспорте// Научные проблемы водного транспорта № 76(3)-2023- С.141-165.
5. Вертиго С.А., Кудряшов А.Б. Участие России в международных транспортных коридорах как фактор социально-экономического развития страны // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – Том 10. – № 11А. – 2020. – стр. 184-196. DOI: 10.34670/AR.2020.22.83.019.
6. Кириллова А. Г. Актуальные аспекты развития международных транспортных коридоров в России // Транспорт Российской Федерации. – 2018. – № 2 (75). – С. 51-54.
7. Интеграция в тестовом режиме – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1582615&архив=2021.10.13> (дата обращения 01.05.2024).
8. Сеницына А. С., Делз С. В., Галиант С. А. Мультимодальные перевозки в коридоре Север–Юг // Мир транспорта. - 2018. – Том 16. – № 3. – с. 178-189.
9. Сингх Р. М. Международный транспортный коридор Север–Юг: возрождение индийских ворот в Евразию. Институт оборонных исследований и анализа, Нью-Дели, Индия, 2015, 8 с. [Электронный ресурс]: https://idsa.in/system/files/краткое_описание_проблемы/IB_msroy_180815.pdf. Дата обращения: 22.10.2019.
10. Сарма Х. С., Джафарова В. Международный транспортный коридор Север–Юг: Азербайджан на перепутье. Азербайджанский журнал экономических и социальных исследований. 2017. Том 4, № 1. С. 13-29.
11. Зиядов Т. Азербайджан как региональный центр в Центральной Евразии: стратегическая оценка евразийской торговли и транспорта. Азербайджанская дипломатическая академия, Баку, Азербайджан. 2012. 288 с. [Электронный ресурс]: http://books.google.ru/books?id=48CHpkjeCcEC&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false. Дата обращения: 22.10.2019.
12. Сарма Х. С. Трансформация международного коридора Север–Юг в "цифровой коридор". Сравнительная политика в России, 2018, Том 9, выпуск 4, с. 124-138.

13. Пасси Р. Денежные вопросы: обсуждение экономики INSTC. ИЗ статьи в периодическом издании. Апрель 2017, № 112. Исследовательский фонд Observer, 2017, 34 с.
[Электронный ресурс]: <http://www.orfonline.org/research/money-mattersdiscussing-the-economics-of-the-instc/>. Дата обращения: 22.10.2019.

References

1. Husein K. The current state and scientific and practical tasks of the development of transport and logistics services for foreign trade in the ports of the North-South MTC / K. Hussein, V. N. Kostrov // Transport. Development Horizons: Proceedings of the 2nd International Scientific and Industrial Forum, Nizhny Novgorod, 07-09 June 2022. Nizhny Novgorod: Volga State University of Water Transport. - 2022. - p. 23.
2. Official website of the Ministry of Transport of the Russian Federation // URL: <http://mintrans.gov.ru>.
3. Suez Canal vs (North-South).Russia, India and Iran will create a new cargo corridor.(accessed 05/23/2022)
4. O.L. Domnina, V.N. Kostrov, A.O. Nichiporuk The current state, problems and main directions of logistics development in water transport// Scientific problems of water transport No. 76(3)-2023- pp.141-165.
5. Verigo S.A., Kudryashov A.B. Russia's participation in international transport corridors as a factor of socio-economic development of the country // Economics: yesterday, today, tomorrow. – Volume 10. – No. 11A. – 2020. – pp. 184-196. DOI: 10.34670/AR.2020.22.83.019.
6. Kirillova A. G. Actual aspects of the development of international transport corridors in Russia // Transport of the Russian Federation. – 2018. – № 2 (75). – Pp. 51-54.
7. Integration in test mode – [Electronic resource] – Access mode: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1582615&archive=2021.10.13> (accessed 01.05.2024).
8. Sinitsyna A. S., Delz S. V., Galyant S. A. Multimodal transportation in the North–South corridor // Mir transport. - 2018. – Volume 16. – No. 3. – pp. 178-189.
9. Singh R. M. The International North–South Transport Corridor: Revitalizing the Indian Gateway to Eurasia. Institute of Defense Research and Analysis, New Delhi, India, 2015, 8 p. [Electronic resource]: [https://idsa.in/system/files/brief description of the problem/IB_msroy_180815.pdf](https://idsa.in/system/files/brief%20description%20of%20the%20problem/IB_msroy_180815.pdf). Accessed 10/22/2019.
10. Sarma H. C., Jafarova V. International North–South transport Corridor: Azerbaijan at the crossroads. Azerbaijan Journal of Economic and Social Research. 2017. Volume 4, No. 1. pp. 13-29.
11. Ziyadov T. Azerbaijan as a regional center in Central Eurasia: strategic assessment of Eurasian trade and transport. Azerbaijan Diplomatic Academy, Baku, Azerbaijan. 2012. 288 p. [Electronic resource]: http://books.google.ru/books?id=48CHpkjeCcEC&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false. Accessed 10/22/2019.
12. Sarma H. C. Transformation of the international North–South corridor into a "Digital corridor". Comparative Politics in Russia, 2018, Volume 9, Issue 4, pp. 124-138.
13. Passi, R. Monetary issues: Discussing the Economics of INSTC. ORF periodical article. April 2017, No. 112. Observer Research Foundation, 2017, 34 p. [Electronic resource]: <http://www.orfonline.org/research/money-mattersdiscussing-the-economics-of-the-instc/>. Accessed 10/22/2019.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Хусейн Карам, аспирант, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Н.Новгородул, ул. Нестерова,5,
e-mail: karamhusein77@gmail.com

Karam Husein, graduate student, Volga state university of water transport, 603950, N.Novgorod, st.Nesterova, 5,
e-mail: karamhusein77@gmail.com

Статья поступила в редакцию 29.07.2025; опубликована онлайн 20.09.2025.
Received 29.07.2025; published online 20.09.2025.

УДК 33

DOI: 10.37890/jwt.vi84.633

Инновационный подход в IT-технологиях пригородного железнодорожного комплекса

В.С. Чеботарев¹

ORCID: 0000-0002-2913-2360

П.Н. Пешехонов²

ORCID: 0009-0003-2734-1251

О.Л. Морозов³

ORCID: 0000-0001-6526-2755

А.В. Дорожкин⁴

ORCID: 0000-0003-3578-6421

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

²*АО «Северо-Западная пригородная пассажирская компания», г. Санкт-Петербург, Россия*

³*Нижегородская академия МВД России, г. Нижний Новгород, Россия*

⁴*Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия*

Аннотация: в статье рассмотрено происхождение и смысл понятия инновация, значение ее в экономике. Рассмотрена роль науки и технологий в экономической системе, зависимость инноваций от технологий, готовности общества к новшествам и научным разработкам. Приведены примеры первоначального внедрения цифровых инновационных технологий на примере платежных систем. Озвучена роль государства, как регулятора развития инноваций, направленных не только на прибыль в экономических процессах, но и на перспективу, на науку и прогресс. Отмечена роль транспорта и логистики, как одной из важнейших составляющих экономики страны, и необходимости внедрения инноваций в данной сфере, обозначена важность железнодорожных перевозок. Рассмотрены нормативные документы, в которых закреплено понятие инновация, и тенденции инновационного развития ОАО «РЖД». Отражены приоритеты и перспективы научно-технологического развития ОАО «РЖД» и новые инновационные подходы. Приведены выводы, что повышение качества деятельности организаций не может быть достигнуто без применения новых научных, технологических и информационных подходов. Обсуждены некоторые аспекты реализации проекта «Цифровая железная дорога ОАО «РЖД», в части развития информационных цифровых систем, в части технологии беспроводной связи, работы с большими информационными данными, искусственного интеллекта и нейротехнологий, системы распределенного реестра. Приведены примеры внедрения и использования инновационных технологий, таких как автоматизированная информационная система управления льготными и субсидированными перевозками (АИС УЛСП), «Лист ожидания» в приложении «РЖД Пассажирам», «Инновационная мобильность», оплата по геолокации на пригородных направлениях на базе приложения «ПроТранспорт+». Рассмотрены вопросы тестирования проекта льготных перевозок для категории пассажиров «Члены многодетных семей» на базе приложения «ПроТранс+». Авторами рассмотрен проблемный вопрос по предоставлению льгот на пригородном железнодорожном сообщении для пассажиров, имеющим право на предоставление региональных льгот, на примере зоны обслуживания АО «СЗППК». Предложены решения данной проблемы с применением цифровых IT-технологий в пригородных перевозках на базе имеющихся цифровых платформ, озвучены приоритеты по улучшению качества предоставляемых услуг и оптимизации процессов при использовании данных инноваций, предполагаемые ожидания по полному переходу на цифровое обслуживание пассажиров. Отражено, что внедрение

инновационных IT-технологий тесно связано с выполнением поставленных задач Президентом и Правительством Российской Федерации по развитию транспортной системы страны на перспективу до 2030 года.

Ключевые слова: инновации, IT-технологии, логистика, научно-технологическое и инновационное развитие железнодорожного комплекса, пригородные железнодорожные перевозки, региональные льготы, цифровое обслуживание пассажиров.

An innovative approach in IT technologies of the suburban railway complex

Vladislav S. Chebotarev¹

ORCID:0000-0002-2913-2360

Pavel N. Peshekhonov²

ORCID: 0009-0003-2734-1251

Oleg L. Morozov³

ORCID: 0000-0001-6526-2755

Artyom V. Dorozhkin⁴

ORCID:0000-0003-3578-6421

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

²*JSC "North-Western Suburban Passenger Company", St. Petersburg, Russia*

³*Nizhny Novgorod Academy of the Ministry of Internal Affairs of Russia*

⁴*National Research University of Nizhny Novgorod named after N.I. Lobachevsky, Nizhny Novgorod, Russia*

Abstract: The article examines the origin and meaning of the concept of innovation, its importance in the economy. The role of science and technology in the economic system, the dependence of innovation on technology, and society's readiness for innovation and scientific development are considered. Examples of the initial implementation of digital innovative technologies are given on the example of payment systems. The role of the state as a regulator of the development of innovations aimed not only at profit in economic processes, but also for the future, for science and progress is voiced. The role of transport and logistics, as one of the most important components of the country's economy, and the need to introduce innovations in this area were noted, as well as the importance of rail transportation. The normative documents in which the concept of innovation is fixed and the trends of innovative development of JSC Russian Railways are considered. The priorities and prospects of scientific and technological development of Russian Railways and new innovative approaches are reflected. It is concluded that improving the quality of organizations' activities cannot be achieved without the use of new scientific, technological and information approaches. Some aspects of the implementation of the Russian Railways Digital Railway project were discussed, in terms of the development of digital information systems, wireless communication technology, work with big information data, artificial intelligence and neurotechnologies, and a distributed registry system. Examples of the introduction and use of innovative technologies are given, such as the automated information system for managing preferential and subsidized transportation (AIS ULSP), the "Waiting List" in the Russian Railways for Passengers application, Innovative Mobility, and geolocation payments on suburban routes based on the ProTransport+ application. The issues of testing the project of preferential transportation for the category of passengers "Members of large families" based on the application "ProTrans+" are considered. The authors consider the problematic issue of providing benefits on commuter rail services for passengers eligible for regional benefits, using the example of the service area of JSC NWPPK. Solutions to this problem are proposed using digital IT technologies in suburban transportation based on existing digital platforms, priorities for improving the quality of services provided and optimizing processes when using these innovations, and anticipated expectations for a full transition to digital passenger service. It is reflected that the introduction of innovative IT technologies is closely

linked to the fulfillment of the tasks set by the President and the Government of the Russian Federation for the development of the country's transport system for the future until 2030.

Keywords: innovations, IT technologies, logistics, scientific, technological and innovative development of the railway complex, commuter rail transportation, regional benefits, digital passenger service.

Введение

В переводе с английского языка слово «инновация» переводится как «введение нового» или «процесс внедрения новшества», само происхождение данного слова уходит в века древнего мира и происходит от латинского слова «novatio», что означает – «обновление, изменение» и слова приставки «in», что означает – «в направлении», фактически «innovatio» переводится как – «в направлении изменений» [1-2].

В 1911 году в своей работе «Теория экономического развития», американский экономист австрийского происхождения Й.А. Шумпетер, впервые ввел понятие «инновация», - не просто как «нововведения», а как фактор экономического производства [3]. Он первым предположил, что толчок развитию дают не только внешние факторы, но и внутренние, которые изнутри «взрывают» равновесие рыночной системы. Этими внутренними факторами становятся новые комбинации факторов производства, которые и определяют динамические изменения в экономике. По мнению Й.А. Шумпетера квинтэссенция инноваций определяется как изменение производственных факторов, мотивированное предпринимательским духом, с целью использования и внедрения новых видов и разновидностей товаров, новых методов и способов производства и обработки, новых источников сырья и материалов, освоения новых рынков и сегментов, новых форм организации и управления производством.

В современной мировой экономике явно намечается тенденция перехода от индустриального типа экономики к постиндустриальному, т.е. к инновационной экономике, которая основывается на наукоемких информационно-цифровых технологиях и результатах интеллектуальной деятельности.

По мнению К.А. Бармута, роль инноваций в современной экономике значительно возросла, тенденции мирового развития свидетельствуют о том, что инновационный подход становится необходимым для успешного развития предприятий, и на сегодняшний момент являются символом успешного развития экономики [4].

По своей сути внедрение инноваций – это процесс, который включает в себя организационно-технологические и экономические процессы, опирающиеся на научный (новейшие технологии), и интеллектуальный (изобретения) потенциалы.

К примеру, известный американский изобретатель и предприниматель Илон Маск, хорошо продемонстрировал возможности цифровых инновационных технологий, в его первом инновационном проекте PayPal – платёжная интернет-площадка, которая принесла ему всемирную известность [5]. И смог он это осуществить на основе имеющихся технологий, его идея была использовать имеющиеся технологии для создания удобной и быстрой платёжной системы, что быстро нашло отклик в среде общества и экономики, которые на тот момент уже были готовы к таким нововведениям в системе оплаты за товары и услуги.

В современном мире уже трудно представить развитие экономики без взаимодействия с наукой, так как она научными методами позволяет найти дополнительные возможности и увеличить потенциал компаний, ускорить развитие производств, улучшить их эффективность работы. Другими словами, можно сказать, что появление новых технологий способствуют поиску удовлетворения новых потребностей общества. Отсюда можно сделать вывод, что инновации без технологий невозможны.

В экономике использование инноваций проявляется прежде всего в рациональном использовании имеющихся средств производств и финансов. Т.е. если внедрение инноваций эффективно, то происходит и активное привлечение инвестиций. На основе данных выводов, можно сказать следующее, что переход к инновационной модели экономики возможен лишь при реальном восприятии инноваций. Другими словами, в рыночных отношениях, если инновация приносит прибыль, значит она эффективна. Вместе с тем прибыль оказывает стимулирующее воздействие на укрепление коммерческого расчета, интенсификацию производства при любой форме собственности [6 - 8].

Но как быть тогда с развитием на перспективу, на науку и прогресс. На наш взгляд в данном случае необходимо вмешательство государства, как заказчика, инвестора и регулировщика.

Инновации являются одной из основных причин возникновения новых производств и даже отраслей промышленности, что в свою очередь приводит к постепенному исчезанию уже существующих и по сравнению с инновационными, малоэффективных. Инновационная деятельность даже изменяет организацию экономики общества, благодаря инновациям появляются новые хозяйствующие предприятия, общественные институты и между ними образуются тесные связи. Инновационные изменения меняют подходы в структуре собственности, в сфере управления в частных и государственных организациях, в социальной сфере общества [8 - 9].

Результаты

Понятие инновации в нашей стране, закреплено Федеральным законом от 23.08.1996 г. № 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике» и имеет следующий смысл: - введенный в употребление новый или значительно улучшенный продукт (товар, услуга) или процесс, новый метод продаж или новый организационный метод в деловой практике, организации рабочих мест или во внешних связях [10].

На наш взгляд, развитие инноваций очень важны, и мы хотели бы рассмотреть некоторые инновации на примере транспорта, так как эта отрасль является одной из важнейших составляющих экономики страны. Транспорт связывает между собой различные районы, предприятия и отрасли народного хозяйства, играет огромную роль при размещении предприятий, заводов и является важным условием рационального расположения производства, создаёт спрос на услуги и товары, необходимые для его функционирования, обеспечивает миграцию и развитие человеческого капитала. Экономическое значение транспорта, заключается в том, что для такой обширной территории нашей страны, для единства и целостности государства необходима развитая транспортная система, которая должна обеспечивать связи и координацию работы всех отраслей экономики [11]. Развитая транспортная сеть позволяет маневрировать различными ресурсами и оперативно решать различные ситуации.

Одними из важнейших видов перевозок в стране являются перевозки по железной дороге с основным перевозчиком ОАО «РЖД». Развитие инновационных подходов в ОАО «РЖД» осуществляется в соответствии с задачами, которые определены Стратегией развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 года (утверждена распоряжением Правительства РФ от 17 июня 2008 г. № 877-р) и Стратегией научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 и на перспективу до 2030 года (утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 17 апреля 2018 г. №769/р).

Приоритеты и перспективы научно-технологического и инновационного развития холдинга:

- доступность и устойчивость транспортной системы, обеспечение транспортной целостности, независимости, безопасности и обороноспособности страны;

- развитие между регионами России транспортных связей посредством создания интеллектуальных транспортных и телекоммуникационных систем, овладение и поддержание лидерских позиций, интеграция в мировое транспортное пространство;
- увеличение значимости транспортно-логистической инфраструктуры в организации перевозок грузов, улучшение качества обслуживания и рост экономической эффективности пассажирских и грузовых перевозок;
- развитие скоростных и высокоскоростных железнодорожных перевозок;
- значимое повышение производительности труда и энергоэффективности на транспорте, за счет перехода к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике;
- достижение передового уровня техники и технологий, соответствующих стандартам качества транспортных услуг, в том числе транспортной, промышленной, пожарной и экологической безопасности;
- переход к передовым цифровым, аппаратно-программным, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным комплексам, новым материалам и способам конструирования;
- создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта, электронного ведения технической документации [12].

В рамках Стратегии научно-технологического развития холдинга «РЖД» рассматривается реализация проекта «Цифровая железная дорога ОАО «РЖД». Аксиома данного инновационного подхода заключается в том, что повышение качества деятельности не может быть достигнуто без применения новых научных и технологических подходов, в частности – информационных. Т.е. повышение качества эксплуатационной деятельности не может быть достигнуто без применения новых научных и технологических подходов, и большинство таких технологий – это информационные технологии. Данный проект подразумевает объединение информационных, цифровых и коммуникационных технологий, стандартов и процессов, построенного на организационном и технологическом взаимодействии сервисных блоков, объединяющих пользователя, транспорт и управление инфраструктурой. Данный проект также ориентирован на технологии, предусмотренные программой «Цифровая экономика Российской Федерации» (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. № 1632-р), такие как: промышленный интернет и технологии беспроводной связи, работа с большими объемами информации, искусственный интеллект и нейротехнологии, системы распределенного реестра, технологии виртуальной и дополненной реальности.

Цель проекта - за счет применения инновационных цифровых технологий, улучшить привлекательность и качество предоставляемых услуг. Реализация данного проекта позволит достичь следующих положительных результатов: снизить влияние человеческого фактора на функционирование производственных железнодорожных процессов; уменьшить бумажный документооборот на железнодорожном транспорте; повысить надёжность и безопасность железнодорожного движения; сократить число работников, находящихся в зоне опасного и интенсивного железнодорожного движения; уменьшить стоимость жизненного цикла железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава; улучшить транспортную логистику; расширить международные транспортные коридоры.

В рамках данной программы предлагается внести инновационные подходы, которые на наш взгляд реализуют следующие аспекты программы: формирование доступной и надежной транспортной системы; развитие транспортных связей между регионами Российской Федерации за счет создания интеллектуальных транспортных и телекоммуникационных систем; повышение качества транспортного обслуживания

грузовладельцев и пассажиров; переход к передовым цифровым, аппаратно-программным и интеллектуальным производственным технологиям; создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта; создание баз электронно-цифрового ведения документации.

Одной из причин медленного развития агломераций является большая площадь страны и высокие экономические издержки, связанные с расстояниями. Соответственно развитие доступной и устойчивой транспортной инфраструктуры в агломерациях, жизненно необходимо. Одним из критериев связанности является транспортная доступность перемещения населения внутри агломерации. Развитие пригородного сообщения в регионах ускорит развитие городских агломераций, позволит перевозить больше пассажиров, тем самым способствуя развитию более тесных связей между ядром и периферией агломерации (общие рынки труда, маятниковые миграции, движение человеческого капитала, доступность к социальным и культурным ценностям, доступность медицинского обслуживания на высоком уровне), что способствует развитию агломерационных эффектов [13].

Применение цифровых технологий в пригородных перевозках в значительной мере повышает удобство для пассажиров и оптимизирует внутренние процессы. Кроме того, развитие цифровых IT-технологий не требуют значительных затрат, как допустим на создание и ввод новых подвижных составов, весь принцип как правило заключается:

- в идее инновации;
- наличии технологий для реализации инновации;
- степени готовности общества к таким инновациям;
- создание и внедрение инновационного продукта.

Так, с 2022 года используется автоматизированная информационная система управления льготными и субсидированными перевозками (далее – АИС УЛСП) – этот сервис дает цифровое подтверждение права на льготный проезд, через интеграцию со всеми ведомствами, обладающими такой информацией, что упрощает приобретение льготных билетов. Т.е. пассажир, обладающий правом льготного проезда, приобретая билет в кассе, может предъявить только СНИЛС и приобрести льготный билет без предоставления подтверждающих документов на льготу (Таб. 1).

Таблица 1

Сравнительные возможности использования льгот пассажирами до и после введения АИС УЛСП (таблица подготовлена авторами).

до введения АИС УЛСП	после введения АИ УЛСП
Приобретение билетов только через кассу при подтверждении право на льготу на бумажном носителе	Цифровое подтверждение права на льготу с возможностью приобретения билета в онлайн режиме
Невозможно купить льготный билет онлайн на разные виды транспорта	Все транспортные льготы объединены в единой базе данных
Нет возможности проверить транспортную льготу или право на субсидированный билет онлайн	Автоматическое предоставление льгот при приобретении билета

Из представленных материалов видно, насколько упростилась возможность использования льгот пассажирами при приобретении билетов и обслуживании пассажиров.

Многие пассажиры уже используют цифровую платформу «РЖД Пассажирам» для приобретения билетов, которая позволяет купить билеты как на поезда дальнего следования, так и на пригородные электрички. На примере внедрения в данную платформу сервиса «Лист ожидания» летом 2024 года (сервис помогает купить билет на поезд, на который билеты в настоящий момент уже распроданы, но могут

появиться позднее, - если в состав добавят вагон или пассажир сдаст билеты) было реализовано свыше 660 000 билетов. Платформа «Инновационная мобильность» позволяет в режиме онлайн планировать, бронировать и оплачивать пассажирские перевозки «от двери до двери» различными видами транспорта, за 2024 год оформлено 525 тысяч билетов, что превышает показатель 2022 года на 68%.

С 2024 года тестируется оплата по геолокации на пригородных направлениях. Для использования данного сервиса пассажиру достаточно скачать мобильное приложение «ПроТранспорт+» на свой телефон и при посадке в транспортное средство гаджет определит геопозицию и идентифицирует перечень транспортных средств, в которых может находиться пассажир, после чего человеку остается лишь выбрать тот, в котором он находится. Оплата разового проезда проходит сразу, а данные о купленном билете отображаются на главном экране и в личном кабинете мобильного приложения. В настоящее время технология внедряется на пригородном железнодорожном транспорте Калининграда, Нижнего Новгорода и Казани. Пассажиры уже совершили более 20 тыс. тысяч поездок. На базе приложения «ПроТранспорт+» внедряется функционал по оформлению электронных билетов на пригородные поезда по студенческой льготе (с использованием электронных студенческих) [14].

Данные цифровые продукты в значительной мере упрощают возможность перемещения населения по территориям страны, как для работы, путешествий, культурных, социальных и оздоровительных нужд.

Обсуждение

С июня 2025 года при поддержке Минтранса России и администрации г. Санкт-Петербурга тестируется проект и по льготному проезду членов многодетных семей на базе полигона обслуживания пригородными железнодорожными перевозками АО «Северо-Западная пригородная компания» (далее – АО «СЗППК»). Для приобретения льготного билета, пассажиру необходимо подтвердить льготу на портале «Единый портал государственных и муниципальных услуг (функций)» (далее - ЕПГУ «Госуслуги»), далее указать СНИЛС и дату рождения в личном кабинете приложения «ПроТранс+» и при покупке билета выбрать категорию «Члены многодетных семей», оплатить проезд банковской картой. Льготные билеты можно оформить в приложении на всех членов многодетной семьи [15].

Если с использованием информационных баз, для предоставления льгот по федеральным льготникам на пригородном железнодорожном сообщении все понятно и система уже работает исправно и ее только дополняют и улучшают, то ситуация с региональными льготниками не так однозначна и имеет свои сложности. Данный вопрос также рассмотрим на примере зоны обслуживания пригородными пассажирскими перевозками АО «СЗППК» - в зоне обслуживания несколько регионов Российской Федерации и предоставляемые пассажирам регионами льготы ветеранам труда и гражданам приравненные к ним сильно отличаются (Таб.2).

Таблица 2

Предоставляемые льготы ветеранам труда и гражданам приравненные к ним, на примере регионов РФ, попадающих в зону обслуживания АО «СЗППК» (таблица подготовлена авторами).

Регион	Наименование категории	Документ, предъявляемый для оформления проезда	Размер скидки
г. Санкт-Петербург	Ветераны труда и граждане, приравненные к ним при достижении возраста, дающего право на пенсию по старости	Документ, удостоверяющий личность и удостоверение ветерана. Может быть использована электронная карта.	100%

Ленинградская область	Ветераны труда и граждане, приравненные к ним при достижении возраста, дающего право на пенсию по старости	Документ, удостоверяющий личность, карточка транспортного обслуживания или электронная карта	90%
Новгородская область	Ветераны труда и граждане, приравненные к ним при достижении возраста, дающего право на пенсию по старости	Документ, удостоверяющий личность и удостоверение ветерана	50%
Псковская область	Ветераны труда и граждане, приравненные к ним при достижении возраста, дающего право на пенсию по старости	Документ, удостоверяющий личность и удостоверение ветерана	50%
Мурманская область	Ветераны труда и граждане, приравненные к ним при достижении возраста, дающего право на пенсию по старости	Документ, удостоверяющий личность и удостоверение ветерана	50%

Из представленного материала видно, что региональные льготы неоднородны, каждый регион по-разному определяет размер льгот, из-за этого у пассажиров возникает путаница, т.к. на одном участке пути ему льгота предоставляется, а на другом нет. Т.е., например, если пассажир имеющий региональную льготу Новгородской области следует из г. Великого Новгорода до г. Санкт-Петербурга, то ему полагается льгота в размере 50% от стоимости билета и только на территории Новгородской области, при проследовании в Ленинградскую область льгота данному пассажиру не предоставляется. Для того, чтобы воспользоваться льготой, пассажир должен купить билет до крайнего остановочного пункта Новгородской области со скидкой 50% (региональная льгота Новгородской области), а потом купить билет от начального остановочного пункта Ленинградской области до г. Санкт-Петербурга за полную стоимость, т.е. пассажиру приходится приобретать два билета. Отсюда возникает неудобство в понимании пассажиром правил предоставляемых ему льгот, а также предоставление полного пакета документов на данную льготу (при контроле оплаты проезда кассир-контролер просит показать прописку для определения действия региональной льготы), К сожалению, данные факты периодически возмущают пассажиров и создают негативные ситуации и конфликты.

При этом, чтобы получить льготу, пассажир может купить билеты только в кассе с предоставлением подтверждающих документов (как правило на бумажном носителе или на социальной карте). И билетному кассиру необходимо удостовериться в действии региональной льготы и выдать билет на зону действия данной льготы, что очень трудоемко и неудобно как для пассажира, так и для перевозчика. Неплохой подход к решению данной ситуацией нашли Ленинградская область и г. Санкт-Петербург, они выдают своим региональным льготникам электронные карты и при приобретении или контроле оплаты проезда, документ, подтверждающий личность, не требуется, достаточно предъявления социальной карты. Но вопрос о приобретении двух билетов, льготного билета только на промежутке его действия и за полную стоимость на территории другого субъекта, остается нерешенным.

Мы считаем, что в настоящее время имеются цифровые возможности и технологии для решения данной проблемы. Как мы уже видим, в нашей стране уже давно успешно используется цифровая платформа ЕПГУ «Госуслуги», благодаря которой большинство социальных действий, таких как оформление различных документов, справок из государственных инстанций и т.п., осуществляется в режиме онлайн и уже обширно используется гражданами и вошло в повседневный обиход.

Отметим, что также успешно действуют цифровые платформы мобильных приложений для приобретения билетов на железнодорожном и общественном транспорте «РЖД пассажирам», «ПроТранспорт+», через которые активно происходит оформление билетов на пригородный и городской транспорт. Что если в данные мобильные приложения вложить алгоритм расчета стоимости билета при учете региональной льготы при следовании пассажиром по выбранному маршруту, в автоматическом режиме (т.е. учитываются зоны действия льгот различных регионов). Т.е. пассажир заранее подтверждает региональную льготу на портале ЕПГУ «Госуслуги». Через личный кабинет в мобильном приложении «ПроТранспорт+» или «РЖД Пассажирам» указывает СНИЛС и подтверждает статус «Регионального льготника» (того или иного субъекта), при этом цифровая система проверяет и подтверждает льготу посредством портала ЕПГУ «Госуслуги». В дальнейшем, при покупке билета в мобильном приложении, пассажиру необходимо будет выбрать категорию «Региональные льготники» и задать маршрут следования. Программа автоматически рассчитывает маршрут, при этом алгоритм искусственного интеллекта учитывает зоны маршрута, подпадающие под льготу региона, и программа автоматически учитывает скидку на выбранном пассажиром маршруте (т.е. учитывает часть проезда по льготе региона, а часть без льгот, - где регион не предоставляет скидку). Алгоритм расчета довольно прост, льгота субъекта распространяется только на остановочные пункты находящиеся в зоне территории субъекта, соответственно к каждому региональному субъекту привязывается перечень данных станций и % льготы от стоимости проезда. Задача программы заключается в следующем: подтвердить статус льготника и регион действия, рассмотреть маршрут пассажира и вычислить станции в маршруте подпадающих под региональную льготу пассажира и не подпадающих под льготу, рассчитать скидку на проезд и суммировать с расстоянием по полному тарифу маршрута. На основании расчета выдать стоимость билета. После чего пассажиру всего лишь надо оплатить проезд банковской картой и при контроле оплаты проезда предъявить билет в мобильном приложении (Рис. 1).

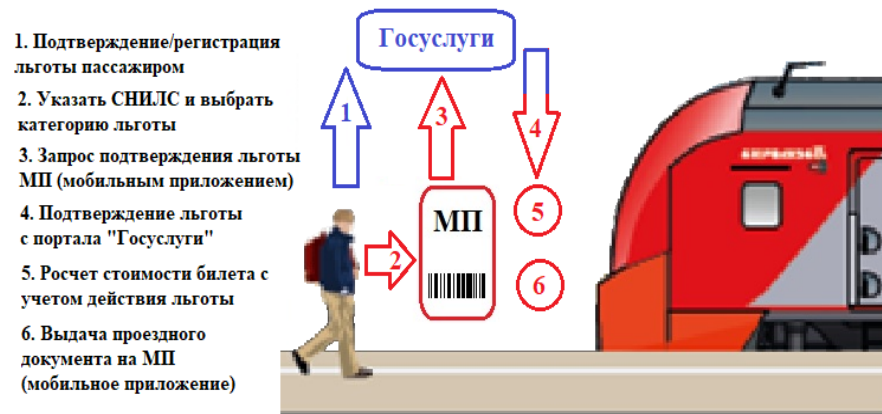


Рис. 1. (подготовлено авторами)

Для возможности автоматического учета льгот, пассажиру всего лишь надо скачать мобильное приложение и внести сведения о льготах через подтверждение на ЕПГУ «Госуслуги» и не нужно будет предоставлять документы для подтверждения льгот при приобретении билета и при контроле оплаты проезда, что значительно улучшит комфорт приобретения билета и проезда пассажира.

Заключение

На наш взгляд, данные новации смогут существенно облегчить процесс приобретения билетов с учетом различных льгот, ускорят удобство оформления билетов (не надо стоять в очереди в кассу), мобильное приложение станет привлекательным для пассажира как способ приобретения билетов и построения маршрутов перемещения, таким образом привлекая граждан к массовому использованию цифровых платформ. По мере развития использования пассажирами цифровых платформ в мобильных приложениях в перспективе можно будет быстро перейти на этап использования идентификации пассажира по его цифровому профилю (реализация инициативы в сфере пассажирских перевозок, включённых в состав стратегического направления в области цифровой трансформации транспортной отрасли Российской Федерации до 2030 года, - проект «Зеленый цифровой коридор пассажира»), с предоставлением всех социальных стандартов. В данном случае пассажиру не понадобится приобретать перевозочные документы и предоставлять пакет документов на льготу, все произойдет в автоматическом режиме, пассажиру просто будет необходимо подтвердить поездку.

При развитии онлайн продаж билетов через данные приложения посредством цифровых платформ, появляются преимущества и для перевозчика:

- улучшение комфортности и привлекательности пригородного железнодорожного транспорта;
- пассажир уходит в цифровое поле по построению маршрутов и оплаты проезда;
- снижение контактов пассажира с фронт-лайн персоналом, а соответственно снижение риска возникновения ошибок человеческого фактора;
- постепенное снижение спроса на приобретение билетов в кассовых окнах, соответственно уменьшение количества кассовых окон на остановочных пунктах, - следовательно, снижение затрат на содержание помещений, персонала, расходных материалов (кассовые аппараты, кассовые ленты и т.п.);
- удобство, ясность и комфорт для пассажиров при приобретении билетов, а, следовательно, снижение негативных реакций и жалоб от пассажиров;
- повышение мобильности и цифровизации перевозок.

По нашему мнению, внедрение данных инноваций тесно связано с выполнением поставленных задач Президентом и Правительством Российской Федерации, отраженных в следующих нормативно-правовых документах:

1) в программе «Цифровая экономика Российской Федерации» (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. № 1632-р) и стратегии научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 и на перспективу до 2030 года (утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 17 апреля 2018 г. № 769/р), в части:

- доступность транспортной системы;
- развитие транспортных связей между регионами посредством создания интеллектуальных цифровых систем;
- улучшение качества обслуживания и рост экономической эффективности пассажирских перевозок;
- повышение производительности труда и энергоэффективности на транспорте;
- достижение передового уровня техники и технологий;
- переход к цифровым, аппаратно-программным, интеллектуальным производственным технологиям;
- создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта.

2) в Указе Президента Российской Федерации от 21 июля 2020 г. № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года», в части:

- достижение «цифровой зрелости» ключевых отраслей экономики; - улучшение качества городской среды;
- увеличение доли массовых социально значимых услуг, доступных в электронном виде.

3) в распоряжении Правительства РФ от 21 декабря 2021 г. № 3744-р «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации транспортной отрасли РФ до 2030 г.», в части внедрения:

- технологии искусственного интеллекта;
- технологии сбора и обработки больших данных;
- технологии систем распределенного реестра.

Внедрение цифровых и инновационных технологий, в значительной степени ускорит реализацию планов по развитию транспортного потенциала страны, будут способствовать укреплению и формированию единого транспортного пространства на территории России, позволят более эффективно развиваться транспортной инфраструктуре и обеспечивать доступность качественных транспортно-логистических услуг для грузоотправителей и населения, на высоком уровне социальных стандартов.

Ожидается, что к 2030 году большинство российских регионов будет работать на цифровых платформах региональной мобильности с возможностью идентификации пассажира по его цифровому профилю. Пассажир сможет оплатить любую поездку, используя свой цифровой профиль, основой которого будут технологии биометрии с учетом федеральных и региональных льгот. Наступает время, когда единая цифровая транспортная платформа станет неотъемлемым элементом технологичных агломераций. Таким образом при внедрении инноваций в сферу транспорта уже через несколько лет цифровизация полностью изменит всю логистику пассажирских перевозок.

Список литературы

1. Чеботарев С.С., Проскурин Б.В., Ельшин В.А. Векторы управления инновациями высокотехнологичных организаций промышленности: методологические аспекты. Москва, 2022. – 148 с.
2. Чеботарев С.С. Экономика чрезвычайных ситуаций: проблемные вопросы инновационно-инвестиционного подхода в сфере управления рисками чрезвычайных ситуаций техногенного характера высокотехнологичной промышленности / Чеботарев С.С. // В сборнике: Гражданская оборона на страже мира и безопасности. Материалы VIII Международной научно-практической конференции, посвященной Всемирному дню гражданской обороны. В 5-ти частях. Москва, 2024. С. 126-130.
3. Шумпетер Й. Теория экономического развития: пер. с нем., Й. Шумпетер. – М.: Прогресс, 1982.
4. Бармута К.А. Необходимость внедрения инноваций на промышленных предприятиях, К.А. Бармута, Научный потенциал мира: материалы IV Междунар. науч. конф. – Прага: Образование и наука, 2007.
5. Артеменко А.И. Изобретения Илона Маска и возможные сферы их применения, Развитие бизнеса и финансового рынка в условиях цифровизации экономики: материалы Международной научно-практической конференции. ФГБОУ ВО «Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова», Волгоградский филиал. 2019. С. 185–189.
6. Чеботарев С.С. Инновационный механизм регулирования и повышения эффективности высокотехнологичных производств / Чеботарев С.С., Жданов В.Л. // Экономика и управление: проблемы, решения. 2024. Т. 5. № 3 (144). С. 171-177.
7. Чеботарев С.С. Современный срез экономических проблем инновационного развития космической промышленности / Чеботарев С.С., Жданов В.Л. // Экономика и управление: проблемы, решения. 2024. Т. 6. № 2 (143). С. 136-142.

8. Муталимов В.А., Густова К.В. Роль инновационной деятельности в современной экономической системе, Научное обозрение. Экономические науки. 2021. № 2. С. 29-33; Режим доступа: <https://science-economy.ru/ru/article/view?id=1075> (дата обращения: 03.06.2025).
9. Чеботарев С.С. Социальные индикаторы оценки эффективности менеджмента как инновационной составляющей управленческой деятельности промышленных предприятий / Чеботарев С.С., Рыжов И.В., Проскурин Б.В. // Вестник евразийской науки. 2024. Т. 16. № 4.
10. Информационный ресурс «Консультант Плюс», Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_11507/c0a49fc869aeeb5b28ca88d3d37b7d8f7474375f/ (дата обращения 07.07.2025).
11. Хегай Ю.А. Проблемы и перспективы развития транспортной системы в России, Теория и практика общественного развития, 2014, № 4, Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemu-i-perspektivy-razvitiya-transportnoy-sistemy-v-rossii?ysclid=mbkhjwf7gk702688959> (дата обращения: 03.06.2025).
12. Информационный ресурс «Консультант Плюс», Режим доступа: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=647425#r04TZoUXGHRzMasT> (дата обращения 27.06.2025).
13. Чеботарев В.С. Роль пригородных железнодорожных перевозок в развитии городских агломераций России и пути их эффективного развития / Чеботарев В.С., Пешехонов П.Н. // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2024. Т. 14. № 6А. С. 241-251.
14. Электронный ресурс Ассоциация «Цифровой транспорт и логистика», Цифровые пассажирские сервисы: будущее транспорта обсудили на ЦИПРе, 02 июня 2025, Режим доступа: <https://www.dtl.ru/news/tsifrovye-passazhirskie-servisy-budushchee-transporta-obsudili-na-tsipre/> (дата обращения 14.07.2025).
15. Информационный портал РБК, РЖД начали тест сервиса льготных билетов на электрички для многодетных, 14.07.2025, Режим доступа: <https://www.rbc.ru/rbcfreenews/6874fe669a79471ff2e42abe> (дата обращения 14.07.2025).

References

1. Chebotarev S.S., Proskurin B.V., Yelshin V.A. Vectors of Innovation Management in High-Tech Industrial Organizations: Methodological Aspects. Moscow, 2022. – 148 p.
2. Chebotarev S.S. The Economics of Emergencies: Problematic Issues of the Innovation-Investment Approach in the Management of Emergencies of a Man-Made Nature in High-Tech Industry / Chebotarev S.S. // In the collection: Civil Defense on the Guard of Peace and Security. Materials of the VIII International Scientific and Practical Conference dedicated to World Civil Defense Day. In 5 parts. Moscow, 2024. Pp. 126-130.
3. Schumpeter J. The Theory of Economic Development: Translated from German by J. Schumpeter. Moscow: Progress, 1982.
4. Barmuta K.A. The Need for Innovation in Industrial Enterprises, K.A. Barmuta, Scientific Potential of the World: Proceedings of the 4th International Scientific Conference. Prague: Education and Science, 2007.
5. Artemenko A.I. Inventions by Elon Musk and Possible Spheres of Their Application, Development of Business and the Financial Market in the Conditions of Digitalization of the Economy: Materials of the International Scientific and Practical Conference. Plekhanov Russian University of Economics, Volgograd Branch. 2019. Pp. 185–189.
6. Chebotarev S.S. Innovative Mechanism of Regulation and Increase of Efficiency of High-Tech Production / Chebotarev S.S., Zhdanov V.L. // Economics and Management: Problems, Solutions. 2024. V. 5. No. 3 (144). Pp. 171-177.
7. Chebotarev S.S. The modern cut of economic problems of innovative development of the space industry / Chebotarev S.S., Zhdanov V.L. // Economy and Management: Problems, Solutions. 2024. V. 6. No. 2 (143). Pp. 136-142.
8. Mutalimov V.A., Gustova K.V. The Role of Innovative Activity in the Modern Economic System, Scientific Review. Economic Sciences. 2021. No. 2. Pp. 29-33; Access mode: <https://science-economy.ru/ru/article/view?id=1075> (accessed: 03.06.2025).
9. Chebotarev S.S. Social indicators of management efficiency assessment as an innovative component of managerial activity in industrial enterprises / Chebotarev S.S., Ryzhov I.V., Proskurin B.V. // Bulletin of Eurasian Science. 2024. Vol. 16. No. 4.

10. Information resource "Consultant Plus", Access mode:
https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_11507/c0a49fc869aeeb5b28ca88d3d37b7d8f7474375f/ (accessed 07.07.2025).
11. Hegai Yu.A., Problems and prospects of the development of the transport system in Russia, Theory and Practice of Social Development, 2014, No. 4, Available at:
<https://cyberleninka.ru/article/n/problemny-i-perspektivy-razvitiya-transportnoy-sistemy-v-rossii?ysclid=mbkhjwf7gk702688959> (accessed on June 3, 2025).
12. Information resource "Consultant Plus", Access mode:
<https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=647425#r04TZoUXGHRzMasT> (accessed on June 27, 2025).
13. Chebotarev V.S. The Role of Suburban Railway Transportation in the Development of Russia's Urban Agglomerations and Ways to Effectively Develop Them / Chebotarev V.S., Peshekhonov P.N. // Economics: Yesterday, Today, and Tomorrow. 2024. Vol. 14. No. 6A. Pp. 241-251.
14. Electronic resource Association "Digital Transport and Logistics", Digital Passenger services: the future of transport discussed at CIPRe, June 02, 2025, Access mode:
<https://www.dtl.ru/news/tsifrovye-passazhirskie-servisy-budushchee-transporta-obsudili-na-tsipre/> (accessed 07/14/2025).
15. The RBC information portal, Russian Railways have started testing the service of discounted train tickets for large families, 07/14/2025, Access mode:
<https://www.rbc.ru/rbcfreenews/6874fe669a79471ff2e42abe> (accessed 07/14/2025).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Чеботарев Владислав Стефанович, доктор экономических наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры экономики и менеджмента, ФГБОУ ВО ВГУВТ, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: vschebotarev@rambler.ru

Vladislav S. Chebotarev, Doctor of Economics, Professor, Chief Researcher of the Department of Economics and Management of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education, 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova str., 5, e-mail: vschebotarev@rambler.ru

Пешехонов Павел Николаевич, начальник отдела качества и работы с обращениями граждан, АО «Северо-Западная пригородная пассажирская компания», 190068, г. Санкт-Петербург, Римского-Корсакова пр., д. 47, лит. А, e-mail: orb.pfo@mail.ru

Pavel N. Peshekhonov, Head of the Department of Quality and work with citizens' appeals of JSC «North-Western Suburban Passenger Company», 190068, St. Petersburg, Rimsky-Korsakov ave., 47, lit. A, e-mail: orb.pfo@mail.ru

Морозов Олег Леонидович, кандидат экономических наук, заместитель начальника (по научной работе), Нижегородская академия МВД России, 603950, Бокс-268, Нижний Новгород, Анкуд9иновское шоссе, 3, e-mail: morozoole@yandex.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,

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», г. Нижний Новгород, пр.Гагарина, 23, e-mail: dorozhkin_av@unn.ru

Artyom V. Dorozhkin, PhD in Economics, 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, Nizhny Novgorod, 23 Gagarin Ave, e-mail: dorozhkin_av@unn.ru

Статья поступила в редакцию 24.07.2025; опубликована онлайн 20.09.2025.
Received 24.07.2025; published online 20.09.2025.

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

**WATER TRANSPORT OPERATION, WATERWAYS
COMMUNICATONS AND HYDROGRAPHY**

УДК 004.942

DOI: 10.37890/jwt.vi84.626

**Исследование влияния скорости судна на русловой процесс в
районе оголенного трубопровода по результатам
математического моделирования гидравлики потока**

С.С. Герасимов

ORCID: 0009-0008-6699-4243

А.Н. Ситнов

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

Аннотация: в настоящее время на территории Российской Федерации функционирует единая глубоководная система (ЕГС), включающая в себя большие судоходные реки и каналы. Часть из них пересекают магистральные трубопроводы, которые, как показывает практика, зачастую имеют небольшую глубину заложения, что впоследствии приводит к возникновению отклонений планово-высотного положения. Помимо естественных русловых переформирований, дополнительно на русловую эрозию оказывает влияние движущееся судно за счет стеснения площади живого сечения русла и работы гребных винтов. Оценить влияние на изменение интенсивности русловой эрозии вблизи оголенного МТ можно с помощью выполнения математического моделирования. В данной статье представлены результаты математического моделирования движения судна проекта 507Г-020-012 по участку реки, на котором располагается оголенный магистральный трубопровод, при разных скоростях собственного движения судна и течения реки.

Ключевые слова: безопасность судоходства, математическое моделирование, вычислительная гидродинамика, магистральный трубопровод

**Study of the influence of vessel speed on the channel process in the
area of an exposed pipeline based on the results of mathematical
modeling of flow hydraulics**

Sergey S. Gerasimov

ORCID: 0009-0008-6699-4243

Aleksandr N. Sitnov

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract: currently, the territory of the Russian Federation operates a single deep-water system (SDWS), which includes large shipping rivers and canals. Some of them are crossed by trunk pipelines, which, as practice shows, often have a shallow depth, which subsequently leads to deviations in the planned-altitude position. In addition to natural channel reformations, channel erosion is additionally affected by a moving vessel due to the constriction of the cross-sectional area of the channel and the operation of propellers. It is possible to assess the impact on the change in the intensity of channel erosion near an exposed MT by performing mathematical modeling. This article presents the results of

mathematical modeling of the movement of a vessel of project 507G-020-012 along a section of the river on which an exposed trunk pipeline is located, at different speeds of the vessel's own motion and the river current.

Keywords: shipping safety, mathematical modeling, computational fluid dynamics, main pipeline

Введение

Судоходство на внутренних водных путях (ВВП) оказывает дополнительное влияние на русловые переформирования за счет возникновения гидродинамических процессов под днищем судна и в прилежащих областях [1], [2]. Интенсивность таких процессов зависит главным образом от собственной скорости судна в спокойной воде, и направления его движения относительно течения реки. Количественно и качественно определить характер взаимосвязи между скоростью движения судна и скоростью течения вблизи оголенного трубопровода для последующего определения безопасной скорости движения судна можно с помощью выполнения математического моделирования гидравлики потока. В данной статье описана исследуемая математическая модель, а также представлены полученные результаты и сделаны общие выводы.

Материалы и методы

Для определения безопасного скоростного режима движения судов и составов на участке с оголенным магистральным трубопроводом была разработана математическая модель, которая принципиально состоит из трёх элементов: судно, трубопровод и физический континуум. Судно представлено корпусом и двумя движителями

(гребными винтами) диаметром 1,8 м. Физический континуум включает участок реки протяженностью 500 м, шириной 50 м, глубиной 4,5, где имеется углубление, на котором расположен оголенный магистральный трубопровод диаметром 1 м.

В качестве расчетного судна использовался проект 507Г-020-012[3], основные характеристики которого приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики судна проекта 507Г-020-012

Параметр	Значение
Длина, м	135,0
Ширина, м	16,5
Осадка, м	3,5
Водоизмещение, т	6710
Количество гребных винтов, шт	2
Диаметр гребного винта, м	1,8

Геометрия расчетного судна представлена на рисунках 1-4.

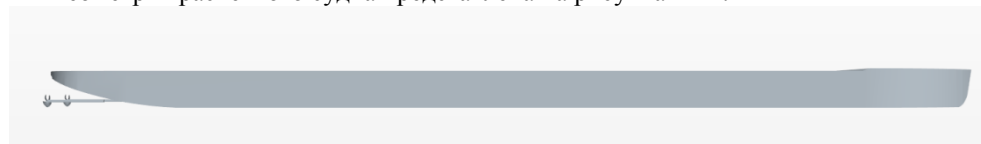


Рис. 1. Общая конфигурация судна

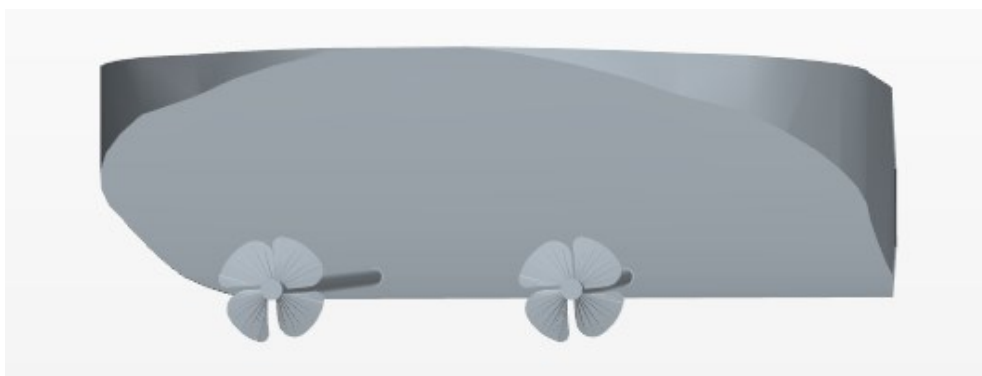


Рис. 2. Гребные винты в корме судна

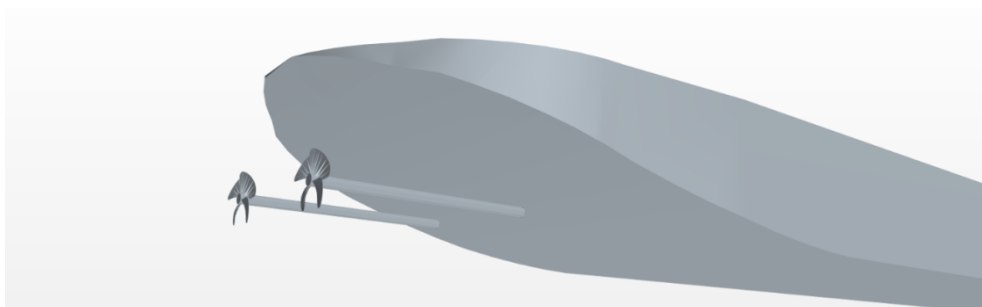


Рис. 3. Корма судна (вид сбоку)

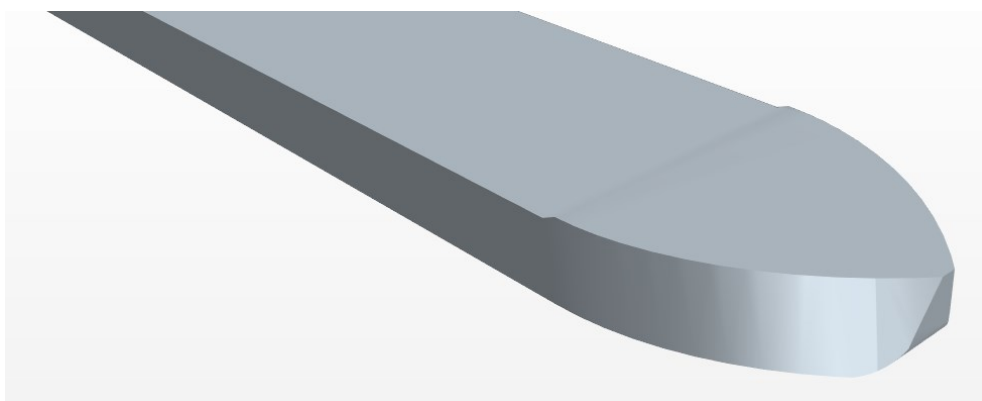


Рис. 4. Носовая часть судна

Для каждого элемента модели была сгенерирована прямоугольная объёмная сетка, которая представлена на рисунках 5-8.

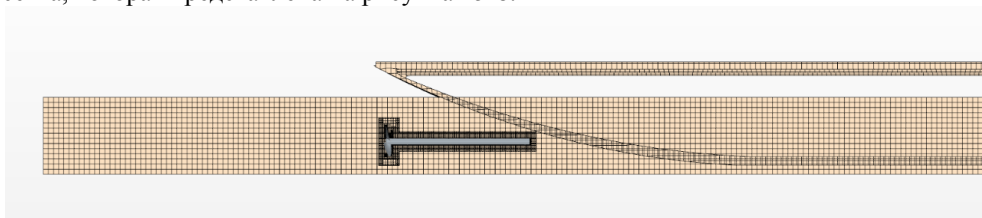


Рис. 5. Объёмная сетка (корма)

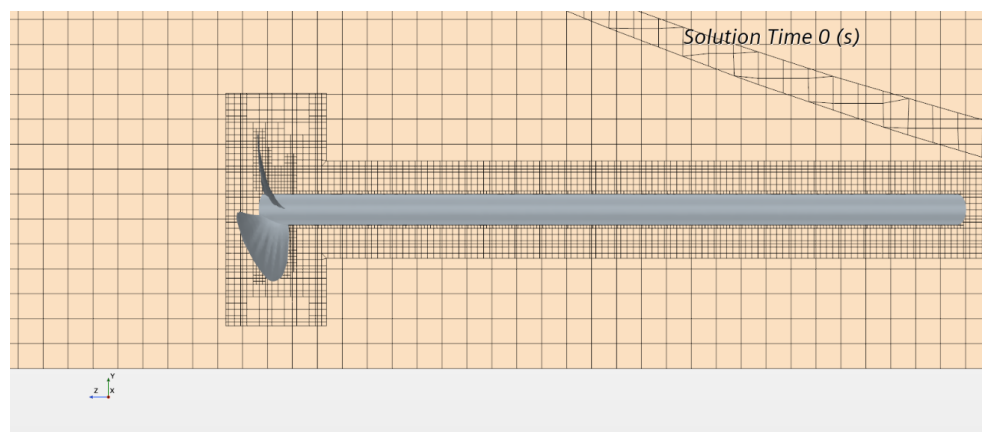


Рис. 6. Объемная сетка (гребной винт)

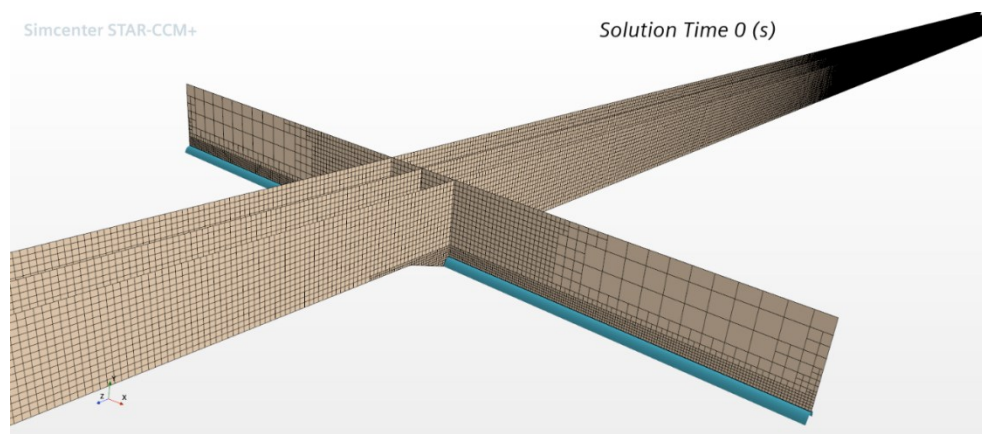


Рис. 7. Объемная сетка (оголенный МТ)

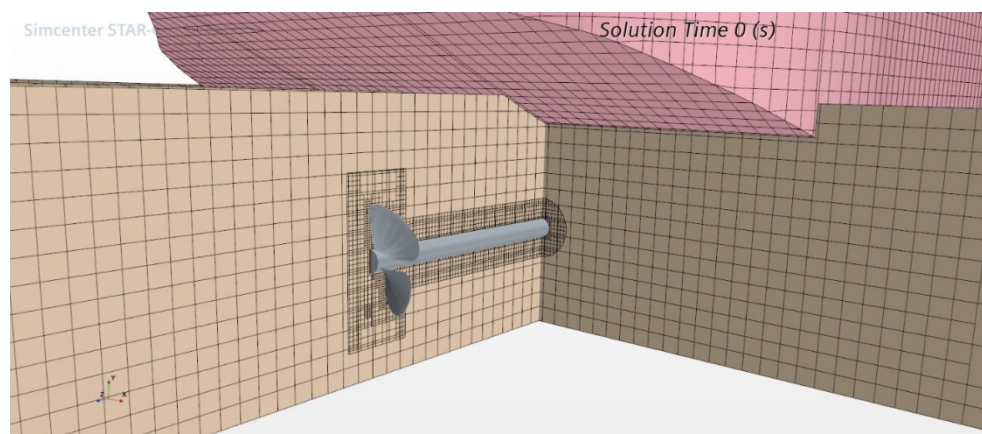


Рис. 8. Объемная сетка (правый гребной винт)

Для моделирования движения судна определена взаимосвязь скорости хода судна и скорости вращения его движителей. Такая взаимосвязь строится на основе результатов тяговых расчетов. Для судна проекта 507Г-020-012 такая зависимость в форме прямой представлена на рисунке 9.

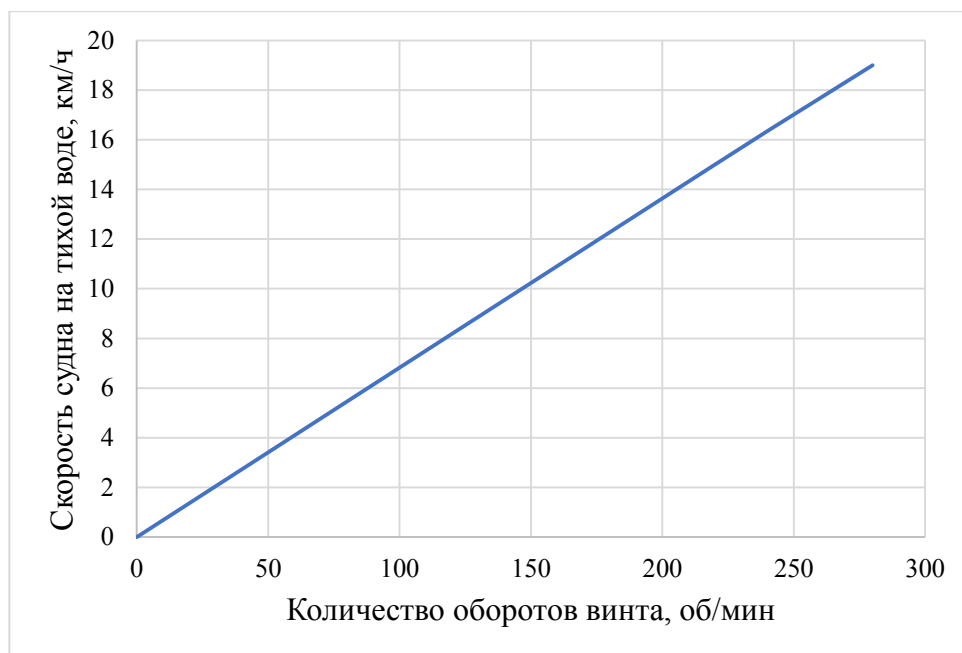


Рис. 9. Зависимость $V_c = f(\omega_v)$

По данному графику были получены значения скорости движения судна при фиксированной скорости вращения гребного винта для разных режимов движения судна: по течению и против. Скорость течения величиной 0,64 м/с принята как средняя скорость течения воды на профиле скорости в естественных условиях в точке 0,6Н, где Н – глубина на моделируемом участке реки. Профиль скорости естественного течения был задан с использованием логарифмической зависимости К.В. Гришанина [4], где поверхностная скорость течения в задаче принята 0,7 м/с.

Полная скорость движения судна (скорость относительно любой неподвижной материальной точки) определяется по формуле:

$$V_n = V_c \pm V_t, \quad (1)$$

где

V_n – скорость движения судна (относительно любой неподвижной точки берега), м/с;

V_c – собственная скорость движения судна на тихой воде, м/с;

V_t – скорость течения, м/с.

Полученные значения скоростей представлены в таблице 2.

Таблица 2

Значения скоростей движения судна при разных режимах его движения

Собственная скорость судна, м/с	Обороты винта		Полная скорость судна, м/с	
	об/мин	рад/с	По течению	Против течения
0,00	0,00	0,00	0,64	-0,64
0,06	2,81	0,29	0,70	-0,58
0,11	5,76	0,60	0,75	-0,53

0,17	8,70	0,91	0,81	-0,47
0,22	11,65	1,22	0,86	-0,42
0,28	14,59	1,53	0,92	-0,36
0,42	21,96	2,30	1,06	-0,22
0,56	29,32	3,07	1,20	-0,08
0,69	36,68	3,84	1,33	0,05
0,83	44,05	4,61	1,47	0,19
0,97	51,41	5,38	1,61	0,33
1,11	58,77	6,15	1,75	0,47
1,25	66,14	6,93	1,89	0,61
1,39	73,50	7,70	2,03	0,75
2,78	147,14	15,41	3,42	2,14
4,17	220,78	23,12	4,81	3,53
5,56	294,42	30,83	6,20	4,92
5,67	300,31	31,45	6,31	5,03

На основе данных, приведенных в таблице 2, разработано и рассчитано несколько вариаций математической модели: М1-М7, каждая из которых имитировала движение судна с заданной скоростью на участке реки, где располагался оголенный магистральный трубопровод [5]. Вариации М1, М2, М3 – это движение судна с разной собственной скоростью по течению; М4, М5 – движение судна с разной собственной скоростью против течения, М6 – естественное течение на участке реки (судно отсутствует); М7 – движение судна по течению без собственной скорости. В данной математической модели для описания турбулентности использовалась модель $k - \epsilon$ [6]. Как сказано выше, цель данного математического моделирования заключается в исследовании гидродинамических процессов, возникающих вблизи оголенного трубопровода при прохождении судов на анализируемом участке. Для исследования было создано несколько контрольных индикаторов – плоских сечений, имеющих нумерацию: Н0, Н1, Н2, Н3, Н4. Сечения расположены в вертикальном направлении в углублении русла на расстоянии 0,2 м между собой. Схема расположения индикаторов и их нумерация представлены на рисунке 10.

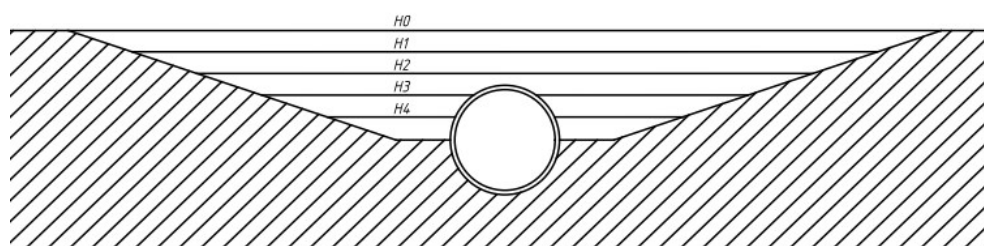


Рис. 10. Схема расположения контрольных индикаторов

В процессе моделирования программа фиксировала максимальную скорость движения воды V_{max} в каждом из контрольных индикаторов. На основе полученных результатов (см. табл. 3) сделаны выводы об изменении скорости движения воды вблизи оголенного трубопровода в процессе прохождения судна.

Результаты

Полученные результаты математического моделирования приведены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты математического моделирования

Вариация математической модели	Скорость судна, м/с		Скорость течения реки V_T	Максимальная скорость течения воды в углублении русла V_{max} , м/с				
	Собственная V_c	Полная V_n		H0	H1	H2	H3	H4
M1	0,42	1,06	0,64	0,71	0,70	0,71	0,53	0,37
M2	1,25	1,89	0,64	1,10	0,91	0,88	0,71	0,56
M3	5,67	6,31	0,64	5,89	3,24	3,04	2,91	2,82
M4	0,97	0,33	0,64	1,31	1,06	1,09	0,94	0,70
M5	2,78	2,14	0,64	3,27	2,10	2,19	1,94	1,52
M6	0	0	0,64	0,69	0,55	0,51	0,41	0,28
M7	0	0,64	0,64	0,89	0,71	0,70	0,55	0,37

По полученным значениям построены профили максимальной скорости движения воды в углублении русла для обоих режимов движения судна: по течению и против. Профили представлены на рисунке 11.

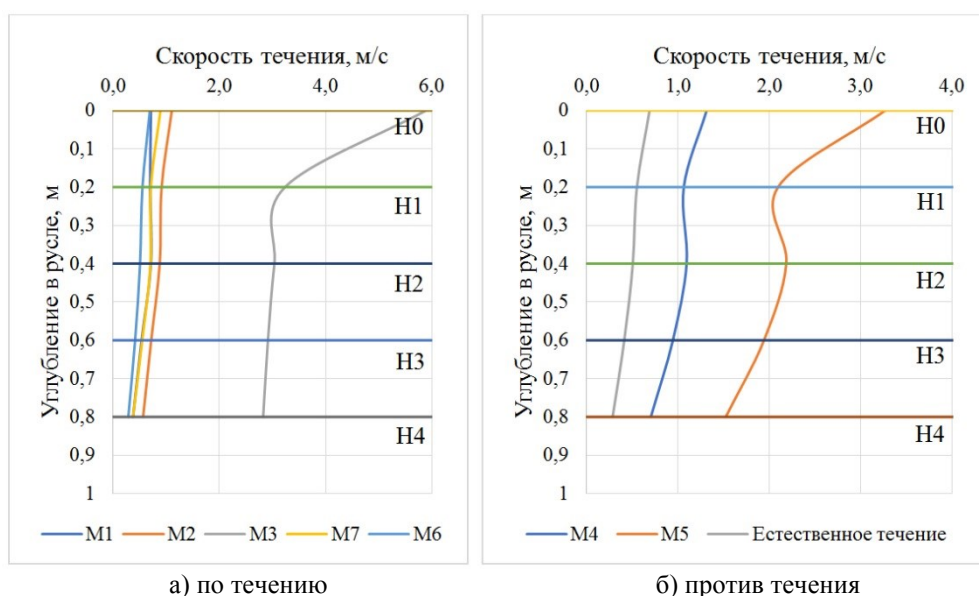


Рис. 11. Профили максимальной скорости течения при движении судна

По полученным значениям были построены кривые зависимости максимальной скорости течения вблизи оголенного трубопровода (на уровне H4) от собственной и полной скорости судна при его движении по течению и против. Кривые представлены на рисунках 12 и 13. Дополнительно на графики нанесены значения допустимых неразрывающих скоростей течения для мелких (0,6 м/с), крупных (0,91 м/с) и среднезернистых (0,72 м/с) песков при глубине потока 4,5 м, которые приведены в ВСН 163-83 «Учет

деформаций речных русел и берегов водоемов в зоне подводных переходов магистральных трубопроводов» [7].

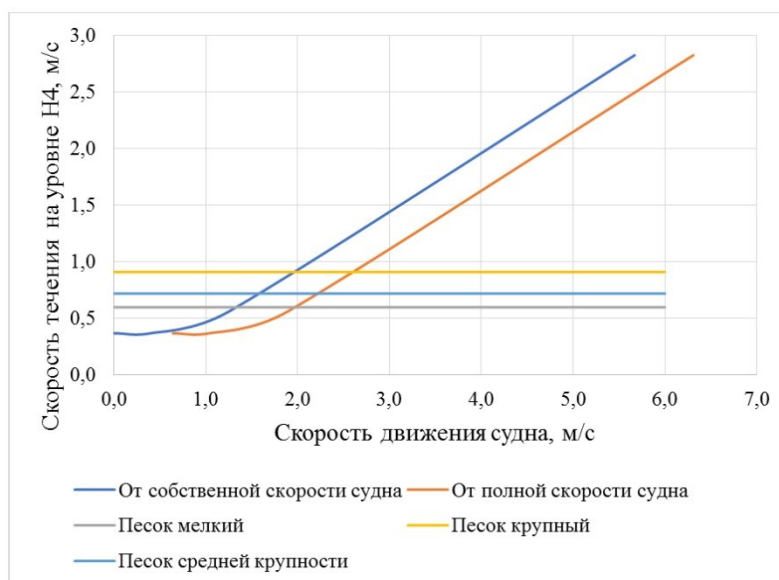


Рис. 12. Зависимость V_{max} от V_c и V_n при движении судна по течению

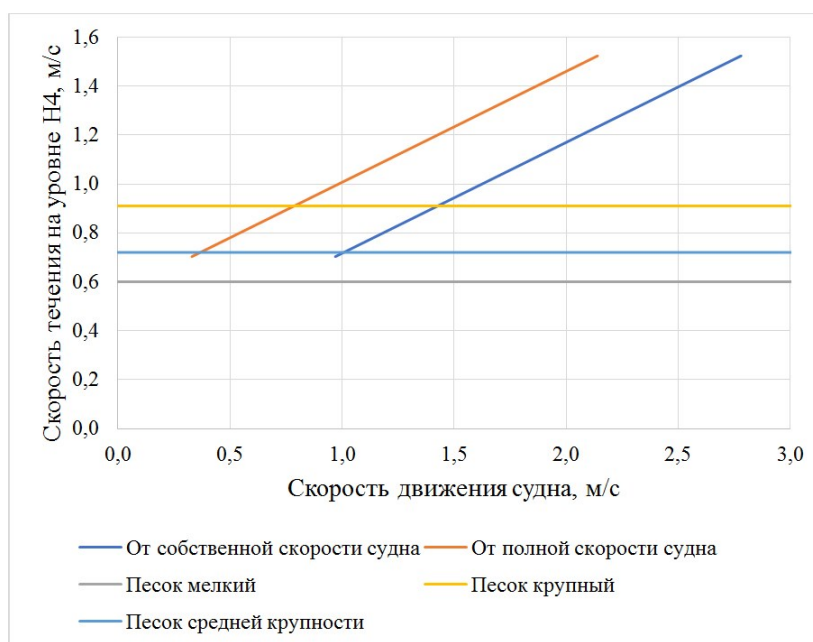


Рис. 13. Зависимость V_{max} от V_c и V_n при движении судна против течения

По полученным кривым были определены максимальные безопасные скорости движения судна, т.е. скорости движения судна, при которых вблизи оголенного трубопровода возникают допустимые неразрывающие скорости движения воды. Эти значения представлены в таблице 4.

Таблица 4

Безопасные скорости движения судна

	Неразмывающая скорость, м/с (глубина потока Н=4,5 м)	Безопасная скорость судна			
		собственная		полная	
		м/с	км/ч	м/с	км/ч
		Песок крупный			
По течению	0,91	1,93	6,95	2,57	9,25
Против течения	0,91	1,43	5,15	0,79	2,84
		Песок средней крупности			
По течению	0,72	1,56	5,62	2,2	7,92
Против течения	0,72	1,01	3,64	0,37	1,33
		Песок мелкий			
По течению	0,6	1,33	4,79	1,97	7,09
Против течения	0,6	0,5	-0,14*	1,8	-0,5*

Примечание: * - отрицательное значение свидетельствует о том, что при любой скорости движения судна максимальная скорость вблизи оголенного трубопровода будет выше, чем допустимая неразмывающая

Адекватность результатов моделирования была подтверждена с помощью математических критериев физичности модели, в частности был использован критерий Куранта-Фридриха-Леви (CFL) [8], значение которого на протяжении всего расчета модели не превышало допустимого значения. В отдельных областях модели значение критерия CFL приближено к идеальному значению (к единице) [9], [10].

Дополнительно в процессе моделирования осуществлялся мониторинг расхода воды на входе в участок и на выходе из него. Разница между этими расходами составляла не более 5-10%, что является допустимым.

Заключение

По результатам математического моделирования гидравлики потока при заданной скорости течения 2,3 км/ч получены следующие результаты:

- 1) при движении судна против течения возникают более интенсивные гидродинамические процессы под днищем судна, в частности, в исследуемом углублении русла по сравнению с движением по течению;
- 2) с точки зрения размыва русла, сложенного преимущественно крупными песками, максимальная безопасная полная скорость судна составляет **9,3 км/ч** при движении по течению и **2,8 км/ч** при движении против. Максимальная безопасная собственная скорость судна на тихой воде составляет **6,95 км/ч** при движении по течению и **5,15 км/ч** при движении против течения.
- 3) с точки зрения размыва русла, сложенного преимущественно песками средней крупности, максимальная безопасная полная скорость судна составляет **7,92 км/ч** при движении по течению и **1,33 км/ч** при движении против. Максимальная безопасная собственная скорость судна на тихой воде составляет **5,62 км/ч** при движении по течению и **3,64 км/ч** при движении против течения.
- 4) с точки зрения размыва русла, сложенного преимущественно мелкими песками, максимальная безопасная полная скорость судна составляет **7,09 км/ч** при движении по течению и **0,5 км/ч** при движении против течения. Максимальная безопасная собственная скорость судна на тихой воде составляет **4,79 км/ч** при движении по течению и **-0,14 км/ч** при движении против. Отрицательные значения свидетельствуют о том, что при любой скорости движения судна скорость вблизи оголенного трубопровода будет выше, чем допустимая

неразрывающаяся.

Как следует из полученных данных, с точки зрения обеспечения сохранности русла в районе расположения оголенного трубопровода, скорость судна при движении против течения должна быть кратно меньше скорости по течению. В дальнейшем, на основе представленных подходов, область исследования будет расширена по диапазону параметров до глубины русла, скорости судна и течения реки.

Список литературы

1. Герасимов, С. С., & Ситнов, А. Н. (2024). Обзор и анализ способов оценки влияния условий эксплуатации подводных переходов магистральных трубопроводов на безопасность судоходства. *Научные проблемы водного транспорта*, (79), 209-218. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi79.495>
2. Герасимов С.С., Ситнов А.Н. Обзор методов и разработка подходов к исследованию системы «судно-трубопровод» в условиях ненормативного состояния магистрального трубопровода. //Транспорт. Горизонты развития. 2024: Материалы международного научно-практического форума. ФГБОУ ВО «ВГУВТ». – 2024. – URL: http://vf-reka-more.rf/2024/6_4.pdf
3. Динамика русловых потоков [Текст] / К. В. Гришанин. - 2-е изд., перераб. и доп. - Л. : Гидрометеиздат, 1979. - 311 с. - Б. ц.
4. Организация и математическое планирование эксперимента: учебное пособие / Ю.В. Юдин, М.В. Майсурадзе, Ф.В. Водолазский. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018.— 124 с.
5. 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>
6. ВСН 163-83. Учет деформаций речных русел и берегов водоемов в зоне подводных переходов магистральных трубопроводов (нефтегазопроводов)" (утв. Миннефтегазстроем 09.06.1982; Мингазпромом 10.11.1983; Миннефтепромом 16.09.1983; Госкомнефтепродуктом РСФСР 12.08.1982; Госкомгидрометом 19.12.1983).
7. R. Courant, K. Friedrichs, H. Lewy. Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik // *Mathematische Annalen*. — 1928. — Т. 100, № 1. — С. 32—74.
8. Patankar S. Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics / Per. from English. – М.: Energoatomizdat, 1984. – 152 p.
9. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method (2nd Edition)', H. Versteeg, W. Malalasekera; Pearson Education Limited; 2007; ISBN 0131274988.

References

1. Gerasimov, S. S., & Sitnov, A. N. (2024). Review and analysis of methods for assessing the impact of operating conditions of underwater crossings of main pipelines on the safety of navigation. *Scientific Problems of Water Transport*, (79), 209-218. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi79.495>
2. Gerasimov S.S., Sitnov A.N. Review of methods and development of approaches to the study of the "vessel-pipeline" system in the conditions of an abnormal state of the main pipeline. //Transport. Development Horizons. 2024: Materials of the international scientific and practical forum. FGBOU VO "VSUVT". - 2024. - URL: http://vf-reka-more.rf/2024/6_4.pdf
3. Dynamics of channel flows [Text] / K. V. Grishanin. - 2nd ed., revised and enlarged. - L.: Gidrometeoizdat, 1979. - 311 p. - B. c.
4. Organization and mathematical planning of the experiment: a tutorial / Yu. V. Yudin, M. V. Maisuradze, F. V. Vodolazsky. - Ekaterinburg: Publishing house of the Ural. University, 2018. - 124 p.
5. 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>

6. VSN 163-83. Accounting for deformations of river channels and banks of water bodies in the zone of underwater crossings of main pipelines (oil and gas pipelines)" (approved by the Ministry of Oil and Gas Construction on 09.06.1982; Ministry of Gas Industry on 10.11.1983; Ministry of Oil Industry on 16.09.1983; State Committee on Oil Products of the RSFSR on 12.08.1982; State Committee on Hydrometeorology on 19.12.1983).
7. R. Courant, K. Friedrichs, H. Lewy. Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik // Mathematische Annalen. — 1928. — T. 100, № 1. — С. 32—74.
8. Patankar S. Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics / Per. from English. — М.: Energoatomizdat, 1984. — 152 p.
9. 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», 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 04.03.2025; опубликована онлайн 20.09.2025.
Received 04.03.2025; published online 20.09.2025.

УДК 656.629

DOI: 10.37890/jwt.vi84.627

Обоснование комбинированных транспортно-логистических схем доставки минеральных удобрений через терминалы портов МТК «Север-Юг»

Н.В. Гончарова

ORCID: 0000-0002-8671-8114

Ю.Н. Уртминцев

ORCID: 0009-0001-4534-4347

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

Аннотация. В данной статье проведен анализ современного состояния терминальной инфраструктуры портов по перевалке удобрений с целью обоснования комбинированных транспортно-логистических схем доставки минеральных удобрений через терминалы портов международного транспортного коридора «Север-Юг». Приведена статистика объемов перевалки через терминалы портов, а также перевозок минеральных удобрений железнодорожным и водным транспортом, в том числе в экспортном направлении. На основе анализа выявлены проблемы дефицита мощностей российских портов, нехватки специализированных терминалов для обработки удобрений, подъездных путей, ограничений пропускной и провозной способности, что затрудняет доставку продукции до потребителей. Рассмотрен потенциал развития грузовых речных портов для включения их в систему международных транспортных коридоров. Выполнен сравнительный анализ стоимости доставки грузов по разным маршрутам с обоснованием комбинированных транспортно-логистических схем доставки минеральных удобрений через терминалы портов МТК «Север-Юг» с участием внутреннего водного транспорта.

Ключевые слова: комбинированные схемы доставки, внутренний водный транспорт, терминалы, речные порты, минеральные удобрения, международный транспортный коридор

Substantiation of combined transport and logistics schemes for mineral fertilizers delivery through the terminals of the ITC «North-South» ports

Natalia V. Goncharova

ORCID: 0000-0002-8671-8114

Yuriy N. Urtmintsev

ORCID: 0009-0001-4534-4347

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. This article analyzes the current state of the terminal infrastructure of ports for transshipment of fertilizers in order to substantiate combined transport and logistics schemes for the delivery of mineral fertilizers through the terminals of ports of the international transport corridor "North-South". The statistics of transshipment volumes through the terminals of ports, as well as transportation of mineral fertilizers by rail and water transport, including in the export direction, are presented. Based on the analysis, the problems of shortage of capacities of Russian ports, lack of specialized terminals for processing fertilizers, access roads, and restrictions on throughput and carrying capacity have been identified, which makes it difficult to deliver products to consumers. The potential for the development of cargo river ports for their inclusion in the system of international transport corridors is considered. A comparative analysis of the cost of cargo delivery along different

routes has been carried out with the justification of combined transport and logistics schemes for the delivery of mineral fertilizers through the terminals of the ports of the ITC «North-South» with the participation of inland waterway transport.

Keywords: combined delivery schemes, inland waterway transport, terminals, river ports, mineral fertilizers, international transport corridor

Введение

За последние годы наблюдаются изменения логистических цепей поставок в новых направлениях экспорта российских минеральных удобрений, связанные с геополитической ситуацией и ограничениями доступа к терминалам прибалтийских портов. В результате чего в 2022 году произошла переориентация грузопотоков из стран Европы в страны Азии, Африки, Латинской Америки. Еще с 90-х годов минеральные удобрения переваливались через порты Прибалтики, а после введения ЕС антироссийских санкций для производителей удобрений доступ к морским европейским портам практически был закрыт [1]. Терминалы российских компаний, расположенных в прибалтийских портах, были заблокированы, а специализированных мощностей для перевалки удобрений на территории России не оказалось. Произошло перераспределение грузопотоков внутри страны с Балтийского бассейна в порты Дальнего Востока и Азово-Черноморского бассейна и выстраивание новых транспортно-логистических схем (ТЛС) доставки, что привело к снижению экспорта минеральных удобрений [2]. По данным Российской ассоциации производителей удобрений (РАПУ) дефицит портовых мощностей для перевалки минеральных удобрений оценивался в 17 млн тонн⁷.

В настоящий момент Россия продолжает укреплять свои позиции по объему производства и экспорта удобрений. Рост экспорта российских удобрений обеспечивается потребителями стран Бразилии, Китая, Индонезии, Латинской Америки, государств Южной Азии, Индии за счет фосфорной, калийной продукции и азотных удобрений, карбамида [3]. Не смотря на тенденцию роста, нехватка специализированных терминалов сдерживает увеличение объемов перевозки минеральных удобрений. Нужны мощности по перевалке грузов, которые позволят наращивать грузооборот и экспорт российской продукции. При этом российские производители готовы увеличивать объемы производства, но дефицит терминальных мощностей ограничивает количество поставок грузов.

Основную роль в логистической цепи поставок сельскохозяйственной продукции выполняют железнодорожные перевозки. Постоянный рост спроса минеральных удобрений на мировом рынке и потребностей предприятий отечественного агропромышленного комплекса увеличивают нагрузку на железную дорогу. Из-за переориентации грузопотока в сторону Дальнего Востока, идущего для азиатских направлений, возникают проблемы с доставкой минеральных удобрений для процесса подготовки к посевному сезону в стране⁸. Нестабильная работа железной дороги, влияет на доставку грузов в морские порты и из них, а недоиспользование потенциала портовых мощностей приводит к невыполнению объемов перевозок не менее 25%, что приводит к потерям грузопотока около 80 млн тонн грузов⁹.

Одним из решений оптимизации доставки необходимых объемов грузов до морских портов может стать переориентация части грузопотоков на внутренний водный транспорт (ВВТ). С помощью ВВТ транспорта возможна частичная разгрузка железной дороги в период навигации, что особенно важно для летнего сезона при массовом пассажиропотоке, из-за которого замедляется пробег грузового транспорта.

⁷ Некоммерческая организация Российская ассоциация производителей удобрений. URL: https://rapu.ru/news/kommentarii_prezidenta_rossiyskoy_assotsiatsii/4982/

⁸ Информационный ресурс ОАО «РЖД». URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=215408>

⁹ Информационный сайт «Ассоциация морских торговых портов». URL: <https://www.morport.com/>

Внутренний водный транспорт имеет огромный потенциал для перевозки грузов и может конкурировать с наземными видами транспорта при условии перевозки грузов судами «река-море» плавания.

Российские минеральные удобрения являются стратегически важным грузом для многих стран и их дефицит может привести к негативным последствиям и вызвать серьезный продовольственный кризис [2]. Во избежание проблем, необходимо развивать терминальную инфраструктуру морских и речных портов, сухопутные и речные подходы для взаимодействия смежных видов транспорта и эффективной логистики в комбинированных сообщениях, с целью увеличения грузопотоков и обеспечения бесперебойных поставок грузов, как для отечественных, так и зарубежных потребителей.

Исследованиями вопросов логистики цепей поставок и терминальной инфраструктуры портов для перевалки грузов занимались такие ученые, как Богачев А.И., Дорофеева Л.Н., Пак Е.В., Сорокина Е.Д., Знатнов С.С., Ермаков С.В., Цверов В.В. и др. [2, 4-7]. В статье Богачева А.И. и Дорофеевой Л.Н., рассмотрена проблема ограничений поставок российских удобрений, из-за чего происходит существенная трансформация товарных потоков и угрозы продовольственной безопасности. Одним из решений задач по развитию отрасли, авторы рассматривают оптимизацию грузопотоков, расширение инфраструктуры в области транспортировки при совершенствовании механизмов государственной поддержки и других мер [2]. Проблема нехватки мощностей российских терминалов стала преградой для белорусского экспорта удобрений, представлено в исследованиях Пака Е.В., Сорокиной Е.Д. Авторами статьи описано, что мощности российских терминалов рассчитаны на объемы экспорта только отечественных удобрений и неспособны обработать объемы белорусских удобрений [4]. В исследованиях Знатнова С.С. описано о возможностях использования ВВТ и речных портов в качестве площадки для развития транзитного потенциала и объемов перевозок грузов по МТК «Север-Юг». Сделаны выводы, что для развития необходимо взаимодействие всех участников транспортного процесса, а создание транспортно-логистических центров (ТЛЦ) обеспечит эффективные комбинированные перевозки с задействованием речных портов и внутреннего водного транспорта [5]. Обоснования использования грузовых терминалов речных портов при обслуживании внешнеторговых грузов и прохождении грузопотоков в системе МТК отражены в исследованиях Ермакова С.В. Автором определено, что внешнеторговые перевозки играют большую роль в экономике страны, а портовые ТЛЦ и грузовые терминалы при взаимодействии видов транспорта могут обеспечивать эффективность транспортного обслуживания грузопотоков в системе МТК с участием водного транспорта [6]. В научном исследовании профессора Цверова В.В. проведен анализ условий возможности создания хаба на Каспийском море и обоснование его значимости, как перевалочного пункта, с учетом включения в процесс перевозки речного транспорта. Рассмотрены варианты цепей поставок с использованием речного транспорта в системе МТК «Север-Юг», где основной причиной слабого участия внутреннего водного транспорта является сезонность работы внутренних водных путей [7].

Целью данного исследования является обоснование комбинированных транспортно-логистических схем доставки минеральных удобрений через терминалы портов МТК «Север-Юг» на основе анализа современного состояния терминальной инфраструктуры российских портов, обеспечивающих перевалку удобрений. Для достижения цели необходимо проанализировать существующую ситуацию и проблем связанных с доставкой удобрений до потребителей. В рамках исследования автором статьи предлагается рассмотреть потенциал развития грузовых речных портов при перевозке минеральных удобрений в комбинированном сообщении и доставке их на внешние рынки по международным транспортным коридорам с участием внутреннего водного транспорта.

Развитие терминальной инфраструктуры грузовых речных портов представляет интерес государства, что отражено в национальном проекте «Эффективная транспортная система»¹⁰. Одной из целей проекта является перераспределение грузопотоков с наземного на речной транспорт, а речные порты могут стать центрами транспортно-логистической системы для обеспечения комбинированных перевозок грузов по международным транспортным коридорам, что обосновывает актуальность данного исследования.

Методы

В исследованиях использованы методы системного и статистического анализа данных, при обобщении статистики Росстата, Федеральной таможенной службы (ФТС), Российской ассоциации производителей удобрений (РАПУ), научных трудов исследователей, данных информационно-аналитических агентств и основных российских производителей, а также периодические издания, информационный потенциал сети Интернет.

Анализ современного состояния терминальной инфраструктуры портов для перевалки и доставки минеральных удобрений

Отрасль российских минеральных удобрений продолжает развиваться и становится все более привлекательной для зарубежных стран. Востребованность в российских грузах связана с низкой себестоимостью производства, по сравнению с другими странами-экспортерами производителями удобрений. Поток дешевых удобрений практически вытеснил европейских производителей, как говорилось в издании Financial Times¹¹, и этот факт, может привести к их уходу с рынка ЕС.

Спрос на минеральные удобрения продолжает расти в направлениях стран Южной Америки, Азии, Африки. По данным статистики и базы данных UN Comtrade¹² основными импортерами российских удобрений в 2024 году стали Бразилия, Китай, Индия, Индонезия, Турция, а также США и страны Юго-Восточной Азии и Евросоюза. Такой спрос на российскую продукцию определяет необходимость развития в России специализированных мощностей и терминалов для перевалки минеральных удобрений.

Как было отмечено выше, грузопотоки удобрений шли через порты Прибалтики и Финляндии. До 2020 года существовал запрет на строительство складов для хранения удобрений ближе 500 метров от кромки воды. В 2023 году Правительством РФ запрет был снят и были внесены поправки в Водный кодекс, которые снимают ограничения на строительство соответствующих специализированных терминалов в непосредственной близости от береговой линии¹³. Кроме этого, был определен перечень морских портов, на территориях которых разрешается размещение специализированных хранилищ для удобрений¹⁴. В перечень вошло 6 морских портов: Усть-Луга, Высоцк, Тамань, Мурманск, Восточный и Ванино, в дальнейшем был добавлен порт Архангельск.

¹⁰ <https://национальныепроекты.рф/new-projects/transport/vnutrennie-vodnye-puti/>

Информационный ресурс Росморречфлота. URL: <https://morflot.gov.ru/novosti/lenta/novye-proekty-razvitiya-vnutrennikh-vodnykh-putei-obsudili-na-otraslevoi-konferentsii-rosmorrechflota-v-ramkakh-transportnoi-nedeli/>

¹¹ Financial Times. URL: <https://www.ft.com/content/8d4e6543-f210-4a26-9bed-93fd0c35b6e6>

¹² UN Comtrade. URL: <https://comtradeplus.un.org/TradeFlow>

¹³ Водный кодекс Российской Федерации" от 03.06.2006 N 74-ФЗ (ред. от 08.08.2024) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2025) URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_60683

¹⁴ Распоряжение Правительства РФ от 29.03.2024 N 742-п (ред. от 30.05.2024) «Об утверждении перечня морских портов, на территориях которых разрешается размещение специализированных хранилищ аммиака, метанола, аммиачной селитры и нитрата калия за пределами прибрежных защитных зон» URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_473909/

Сегодня доставка минеральных удобрений до морских портов РФ в основном осуществляется по железной дороге. За 2024 год железнодорожным транспортом большую часть удобрений доставили в морские терминалы Северо-Запада (26,5 млн тонн), увеличение составило 25,5 % к предыдущему году, в направлении Юга (4 млн тонн) рост был на 7,3% и Дальнего востока (163,2 тыс. тонн) объем перевозок вырос в 1,7 раза, по отношению к 2023 году. Всего ОАО «РЖД» за прошлый год на экспорт было отправлено 36,2 млн тонн минеральных удобрений, из них 30,6 млн тонн проследовало в адрес морских портов¹⁵. Объемы перевозок минеральных удобрений железнодорожным и морским транспортом на экспорт представлены на (рис. 1).

По данным Ассоциация морских торговых портов через порты России в 2024 году перевалено 42,5 млн тонн химических и минеральных удобрений, больше на 15%, чем годом ранее, в 2023 году перевалка составила 36,7 млн тонн груза. За последние пять лет наблюдается динамика увеличения объемов перевалки удобрений через морские порты РФ.

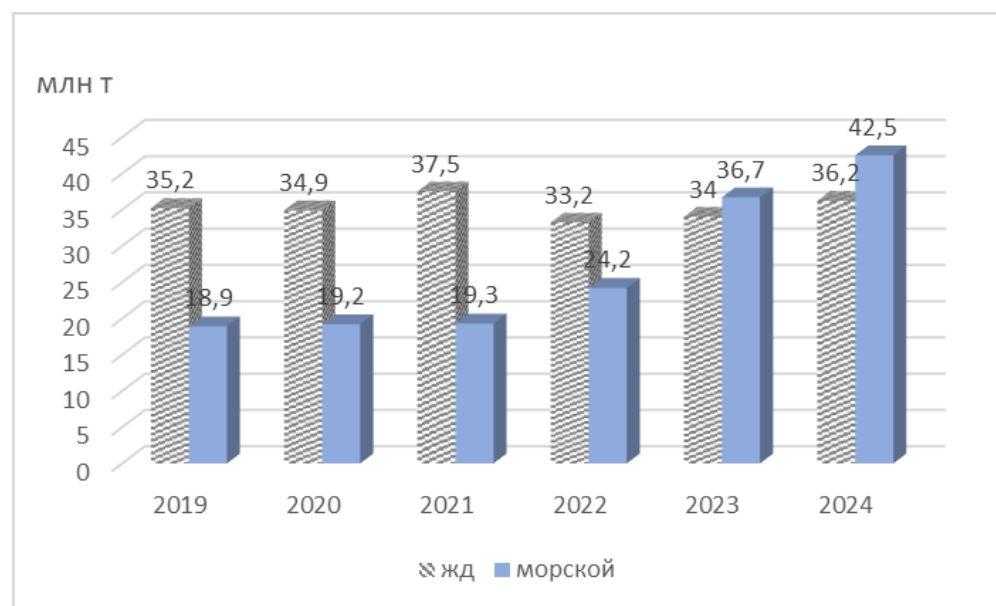


Рис.1. Объемы перевозки минеральных удобрений железнодорожным и морским транспортом на экспорт за 2019-2024 гг.

Основные терминалы по обработке минеральных удобрений расположены в Балтийском и Азово-Черноморском бассейнах, через них осуществляется максимальная отгрузка груза, что показано на (рис.2). Наибольший объем минеральных удобрений более 80% идет через порты Балтийского бассейна, в 2024 году грузооборот составил 36 млн тонн. В первую очередь, это связано с расположением большинства производителей продукции, которые находятся в европейской части страны, а порты Балтики подходят для экспорта грузов в страны Латинской Америки и Африки.

¹⁵ Информационный ресурс ОАО «РЖД» URL: <https://cargo.rzd.ru/ru/9514/page/3104?id=310982>

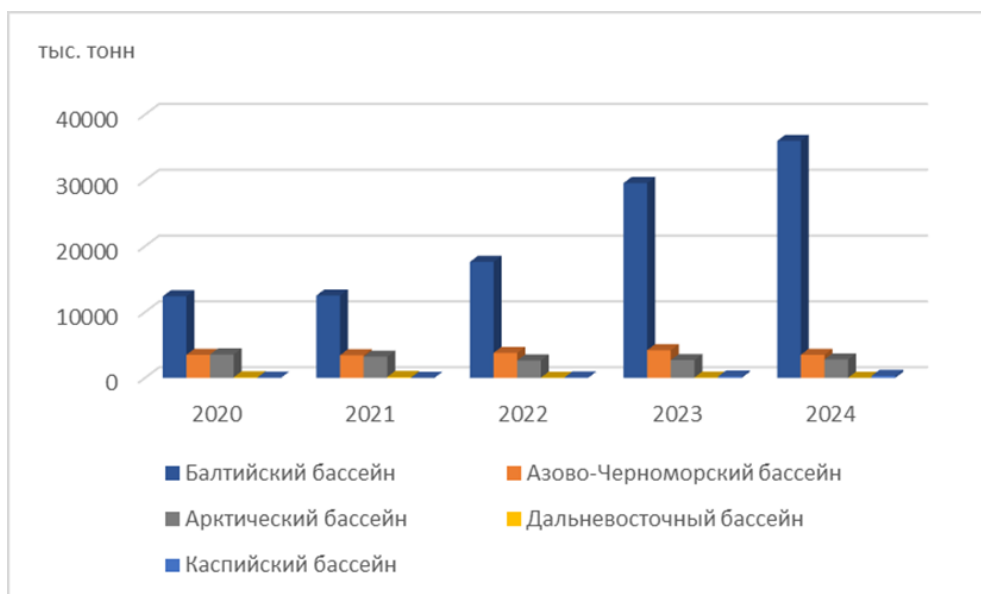


Рис. 2. Динамика перевалки минеральных удобрений по бассейнам в морских портах за 2020-2024гг

Производители удобрений продолжают наращивать свое производство, в связи с этим расширяются и терминальные мощности морских портов, в частности Большого порта Санкт-Петербурга и порта Усть-Луга, где выполняется основной объем перевалки удобрений, представлено на (рис.3).

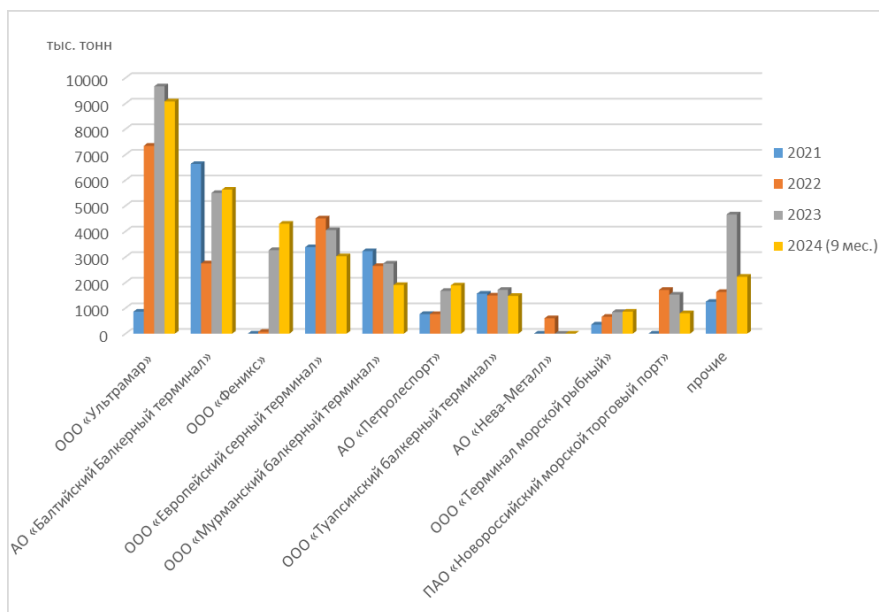


Рис. 3 Объемы перевалки удобрений крупнейших терминалов РФ за 2021-2024гг, тыс. тонн

Порты Балтийского бассейна обладают широкой инфраструктурой обеспечивающую эффективную работу терминалов по перевалке минеральных

удобрений. Одним из лидеров за прошлый год стал терминал ООО «Ультрамар». В 2024 году объем перевалки ООО «Ультрамар» составил почти 10 млн тонн груза. Заявленная мощность терминала до 37 млн тонн в год. Терминал позволяет обеспечить необходимую скорость и качество перевалки для всех судов дедевейтом 130 тыс. тонн с гарантированным доступом к специализированной глубоководной портовой инфраструктуре¹⁶. Также новый терминал Port Favor порта Усть-Луга, обеспечивает обработку удобрений. Терминал начал свою деятельность в декабре 2024 года и за первый месяц работы экспортировал более 62 тыс. тонн аммиака. Заявленная мощность данного терминала 14 млн тонн в год.

Терминалы портов Арктического бассейна Мурманский балкерный терминал (МБТ) и Архангельского морского торгового порта (АМТП) внесли свой вклад в обеспечении транспортно-логистических направлений поставок удобрений в зарубежные страны. В 2024 году МБТ обработал 1,8 млн тонн удобрений. Продолжается строительство мультимодального порта для перевалки белорусских грузов с мощностью терминала от 5 до 7 млн тонн в год. В АМТП за девять месяцев 2024 года перевалено более 400 тыс. тонн минеральных удобрений и отправлены в направлениях южных государств. На терминале «Бакарица» создан склад для хранения 12 тыс. тонн аммиака¹⁷. Пропускная способность грузового морского терминала всего 200 тыс. тонн в год. В перспективе Архангельский порт готов обеспечивать перевалку более 1 млн тонн удобрений в год.

Порты Азово-Черноморского и Каспийского бассейнов, такие как Новороссийск, Тамань, Туапсе, Азов, Ростов-на-Дону, Ейск, Темрюк, Кавказ и порты Каспийского бассейна Астраханский порт, Махачкала и Оля задействованы в перевалке минеральных удобрений и играют ключевую роль в ТЛС поставок грузов в МТК «Север-Юг». Например, ООО «Туапсинский балкерный терминал» (ТБТ) специализируется на перевалке сыпучих грузов и удобрений. По итогам 2024 года, через ТБТ отгружено 2 млн тонн минеральных удобрений. Инфраструктура терминала включает в себя перегрузочный комплекс с крытым складом и объемом хранения грузов до 100 тыс. тонн. В порту Тамань ведется строительство самого крупного склада для хранения удобрений мощностью 300 тонн с перевалкой до 5 млн тонн груза, что позволит сократить дефицит мощностей в стране. Развитие терминальных мощностей Южных портов РФ позволит увеличить возможности экспортной инфраструктуры и объемы поставок на рынки стран Южной Америки, Южной Азии, Ближнего Востока и др.

Одной из актуальных и важных задач по развитию интегрированной инфраструктуры предусматривается создание условий перераспределения грузопотоков и переключение их с наземного на речной транспорт. Внутренний водный транспорт является основным элементом в транспортной системе и имеет огромный потенциал в развитии комбинированных, мультимодальных перевозок. Речные порты наряду с гидротехническими сооружениями и флотом, являются главным звеном в обеспечении перевозочного процесса по ВВП и представляют собой важную роль в развитие международных транспортных коридоров.

Сегодня в России функционирует более 90 речных портов, основная часть которых 54 порта расположены в европейской части страны, это порты Самара, Череповец, Казань, Тольятти, Чебоксары, Ярославль, Архангельск, Москва, Пермь, Саратов, Волгоград, Рыбинск, Сызрань и др. и 37 в Сибири и Дальнем Востоке¹⁸.

¹⁶ Информационный сайт ООО «Морское строительство и технологии». URL: https://morproekt.ru/attachments/article/1350/Kreon_udobren_2024.pdf

¹⁷ Информационный сайт АМТП URL: <https://www.ascp.ru/news/svidetelstvo-o-registratsii-khimicheskii-opasnogo-proizvodstvennogo-obekta-polucheno-amtp/>

¹⁸ Информационный сайт Министерства транспорта Российской Федерации. URL: <https://mintrans.gov.ru/press-center/branch-news/6341>

По данным статистики Росморречфлота произошло небольшое уменьшение объемов погрузочно-разгрузочных работ в речных портах за последний год, в 2024 году было перевалено 114,854 млн тонн груза, годом ранее объемы погрузки имели показатели 125,962 млн тонн, что представлено в (табл.1) [7].

Таблица 1

Объемы погрузочно-разгрузочных работ в речных портах (тыс. т) за 2020-2024 гг.

Наименование грузов	Годы				
	2020	2021	2022	2023	2024
Всего грузов портовых и кооперированных, в том числе минеральные удобрения	123,6	126,3	130,938	125,962	114,854
сухогрузы	117,1	119,1	124,782	121,008	110,905
строительные грузы	-	-	101,868	99,051	89,110
черные металлы	-	-	4,978	5,207	4,945
в контейнерах	1,141	-	1,514	1,354	1,197
наливные	6,42	7,2	6,156	4,954	3,949
экспортные	-	-	5,087	3,242	3,704
импортные	-	-	0,300	0,204	0,254
внутренние	-	-	125,550	122,515	110,896

Несмотря на то, что через речные порты осуществляется небольшой объем перевалок грузов, они по-прежнему имеют важное социально-экономическое значение для страны. Но из-за инфраструктурных проблем и невозможности обеспечить обслуживание и доставку всех необходимых видов грузов внутренний водный транспорт теряет свои объемы перевозок и конкурентные преимущества, тем самым препятствует эффективному развитию транспортной системы страны. Наиболее слабым звеном при транспортировке минеральных удобрений в контейнерах является портовая составляющая. За прошедшие 30 лет на ВВТ не проводилась модернизация портовых и гидротехнических сооружений и не обновлялась перегрузочная техника. Еще одна проблема, это состояния речных портов, износ инфраструктуры, старые причалы, оборудование, транспортные средства, многие были построены еще в Советское время, из-за чего и такая низкая пропускная способность.

На сегодняшний момент речных портов способных работать с удобрениями в России немного, но те порты, которые уже осуществляют перевалку данных грузов нужно развивать и включать в проекты развития транспортной инфраструктуры. Например, АО «Волгоградский речной порт» способен перегружать свыше 3,0 млн тонн в год таких грузов, как уголь, лес, контейнеры, минерально-строительные, металл и химические грузы. Порт взаимодействует с различными предприятиями, и группа компаний ПАО «ФосАгро» является одним из партнеров АО «Волгоградский речной порт». «ФосАгро-Регион» осуществлял в Волгоград доставку удобрений российским аграриям речным транспортом из промышленного порта АО «Апатит» в Череповце на барже-площадке¹⁹. АО «Волгоградский речной порт» имеет всю необходимую инфраструктуру для обработки разных грузов. Общая пропускная способность грузовых причалов при перегрузке навалочных грузов составляет 10000 тонн в сутки, тарно-штучных грузов 3000 тонн.

Еще один крупнейший Усть-Донецкий речной порт специализирующейся на перевалке минеральных удобрений, находится на Юге России. Из порта

¹⁹ Группа «ФосАгро». URL: <https://www.phosagro.ru/press/company/gruppa-fosagro-nachala-dostavlyat-rechnym-transportom-mineralnye-udobreniya-dlya-rossiyskikh-agrariev/>

осуществляется доставка грузов в страны Египта, Израиля, Марокко, Туниса, США и др. Проектная мощность речного порта позволяет обрабатывать до 4 миллиона тонн грузов в год. Имеется 16 складов различных типов вместимостью 49 тыс. м², железнодорожные подъездные пути. В Усть-Донецкий обслуживаются суда класса «река-море» дедевейтом до 5,5 тыс. тонн²⁰.

На сегодняшний момент из речных портов можно выделить один из основных, осуществляющих перевалку минеральных удобрений, это ПАО «Тольятти». Речной порт обладает соответствующей инфраструктурой способной обрабатывать широкую номенклатуру сельскохозяйственной продукции, минерально-строительных грузов, металлопроката, контейнеров и другие. Инфраструктура порта имеет причалы, перегрузочную технику и контейнерный терминал вместимостью 1800 TEU.²¹ Его терминальные мощности позволяют обрабатывать 20-ти и 40-футовые контейнеры до 12 TEU в год, а также выполнять погрузо-разгрузочные работы, таможенные операции, переваливать грузы с одного вида транспорта на другие, осуществлять работу с судами «река-море» плавания с грузоподъемностью до 7500 тонн. Ежегодный грузооборот порта Тольятти составляет более 8 млн тонн, а пропускная способность 10 млн тонн, при этом производственная мощность порта до 5 млн тонн в год.

Благодаря сотрудничеству с ПАО КуйбышевАзот» идут работы по реконструкции портовой инфраструктуры порта, запланировано строительство новых терминалов. В перспективе планируется обновление флота, модернизация инфраструктуры порта, дополнительные площади под обработку контейнеров. Программа реконструкции и модернизации производственных мощностей порта Тольятти позволит максимально эффективно задействовать его в транспортных коридорах "Север-Юг" и "Запад-Восток". Географическое расположение порта определяет его центром Самарской области для прохождения грузопотоков по Волге и Каме и доставкой грузов в регионы страны, а также до портов Балтийского и Азовского морей.

Сегодня порт Тольятти является одним из потенциальных объектов проекта по строительству портового логистического хаба в Самарской области, также рассматривается вопрос включения портовой инфраструктуры Самарской области в межрегиональную концепцию устойчивого формирования МТК «Север-Юг» по речному пути с выходом к странам Каспийского бассейна с доставкой грузов в Китай, Индию и страны Африки²². Поэтому речной порт Тольятти является важным звеном в логистической цепи поставок минеральных удобрений и играет ключевую роль в развитии международного транспортного коридора «Север-Юг» [8].

Результаты

Исходя из вышеизложенного, можно сказать, что для обеспечения эффективной ТЛС доставки минеральных удобрений необходимо использовать терминальную инфраструктуру не только морских, но и речных портов, которые уже осуществляют перевалку удобрений, развивать их потенциал в рамках программ модернизации производственных мощностей. Расширение портовых мощностей обеспечит увеличение пропускной способности и грузооборота, при этом развитие ВВП повысит эффективность внешнеторговых перевозок [10]. Важную роль играет терминальная инфраструктура портов, как транспортно-логистических узлов обеспечивающих взаимодействие видов транспорта [11-13]. На сегодняшний момент инфраструктура речных портов и водных путей неподготовлена для эффективной доставки минеральных удобрений до портов зарубежных стран по речным и морским путям с

²⁰ Информационный сайт Усть-Донецкого речного порта. URL: <https://udport.ru/>

²¹ Официальный сайт полномочного представителя Президента Российской Федерации в Приволжском федеральном округе. URL: <http://pfo.gov.ru/press/events/111295/>

²² ИАА «ПортНьюс» URL: <https://portnews.ru/news/375784/>

участием судов «река-море» плавания, поэтому следует провести анализ направлений грузопотоков с целью их улучшения.

С целью обоснования комбинированных транспортно-логистических схем доставки удобрений через терминалы портов МТК «Север-Юг» автором статьи предлагается рассмотреть и сравнить возможные варианты доставки продукции из Тольятти в Индию по разным ТЛС транспортировки груза. Для этого необходимо проанализировать основные направления доставки минеральных удобрений через терминалы российских портов.

На сегодняшний день основными предприятиями-производителями удобрений в Самарской области, являются ПАО «КуйбышевАзот» и АО «Тольяттиазот». ПАО «КуйбышевАзот» специализируется на производстве капролактама, полиамида, аммиака и азотных удобрений и организует доставку продукции сельхозпроизводителям на внутренний рынок России, а также на внешние рынки в страны Китая, Индии, Латинской Америки, Азии, Африки и СНГ. Доставка продукции КуйбышевАзот осуществляется всеми видами транспорта железнодорожным, автомобильным, морским и речным, в том числе в комбинированном сообщении, через терминалы порта Тольятти.

Как видно из исследований основной грузопоток удобрений идет по железной дороге, при этом производители продукции в навигационный период стараются использовать речные перевозки. Так, например, Тольяттиазот в 2024 году осуществил отгрузку 30 тыс. тонн карбамида на причале АО «Тольяттиазот» на суда класса река-море, вмещающими порядка 5 тыс. тонн карбамида. После отгрузки удобрения были доставлены речным транспортом потребителям в Турцию. Кроме того, продукция «Тольяттиазот» экспортируется и в другие страны-импортеры удобрений.

По итогам 2024 года основными потребителями российских удобрений стали страны Бразилии, Индии и Китая. Наибольший интерес для отечественных производителей удобрений представляет индийский рынок, так как он один из перспективных для увеличения поставок, использование которых является основой для долгосрочного роста урожайности и эффективности индийского сельского хозяйства. В 2024 году российские компании поставили в Индию 4,6 млн тонн удобрений, обеспечив 28% их импорта.

Индия является одним из крупнейших покупателей российских удобрений. Поэтому отечественные производители заинтересованы в сотрудничестве и усилении экспорта за счет оптимизации логистики и гибкости цен, а также благодаря высокому субсидированию со стороны индийского правительства. В основном доставки сельскохозяйственных грузов и удобрений в Индию осуществляются морским путем. Для этого используются специальные контейнеры, которые обеспечивают сохранность груза и сокращают время погрузки-выгрузки в портах. Минеральные удобрения в контейнерах доставляются по транспортно-логистическим маршрутам, где происходит комбинированная перевозка несколькими видами транспорта с перевалкой груза на терминалах портов с одного транспортного средства на другое. Российские удобрения принимаются в индийском порту «Мундра», так как он специализируется на перевалке химических грузов, включая удобрения и имеет всю необходимую инфраструктуру для обработки насыпных, навалочных, наливных грузов и контейнеров [10].

Рассмотрим три основных маршрута доставки удобрений из России до Индии. Первый вариант – это маршрут из портов Санкт Петербург или Новороссийск; второй – доставка на Дальний Восток, через порт Владивостока и третий вариант, через Транскаспийский маршрут, Каспийское море и Иран до Индии. Первый вариант самый распространенный – западный маршрут, где грузы доставляются морским транспортом через Суэцкий канал из портов Санкт-Петербурга или Новороссийска и далее следуют в порты Индии (Нава-Шева (Мумбаи) и Мундра). В портах Санкт-Петербурга есть вся необходимая инфраструктура для обработки минеральных

удобрений, но из-за удаленности и большого расстояния доставка груза по морю, через Суэцкий канал может составлять 30-45 дней. Терминалы ОАО «Новороссийский морской торговый порт» (НМТП) в основном переваливают зерновую продукцию и постепенно расширяют возможности по перевалке металлургической продукции, также ведется реконструкция контейнерного терминала. В восточном районе ОАО «НМТП» действуют терминалы по переработке грузов: цемента, зерна, металлолома и черных металлов, в том числе минеральных удобрений. Проектная мощность терминала для перевалки азотных и комплексных удобрений 2 млн тонн в год. Соответственно, оптимальным будет маршрут, если доставка груза осуществляется только между портами Новороссийска и Индии, где судно идет примерно 17-20 дней. Еще одним преимуществом ОАО «НМТП» является то, что в отличие от Балтийских портов он открыт для навигации круглый год.

Второй маршрут проходит от портов Владивостока через Малаккский пролив в порт Ченнаи, срок доставки грузов составляет от 20 дней. Для перевозки минеральных удобрений до Владивостока потребуется железнодорожный транспорт, а это увеличит срок доставки в два раза с учетом существующих проблем на железной дороге в данном направлении.

Доставка грузов по Транскаспийскому маршруту через Каспийское море осуществляется водным транспортом из портов Астрахань, Оля, Махачкала в иранские порты Бендер-Энзели и Бендер-Амирабад и Ноушехр. Через Иран российские грузы перевозятся автотранспортом или по железной дороге до побережья Персидского залива, далее водным транспортом доставляются в индийские порты. Транзитное время доставки груза на пароме из Астрахани до Энзели составляет 4-5 дней в пути, но иногда паром можно ожидать от 5 дней до одного месяца. Поэтому используются альтернативные маршруты по международному транспортному коридору «Север-Юг», по западной ветке, через Азербайджан железнодорожным и автомобильным транспортом и по восточной, через Казахстан и Туркменистан железнодорожным транспортом. Как правило, доставка грузов из России в Индию транзитом через Иран осуществляется 20-25 дней, это значительно меньше, чем через Суэцкий канал.

При выборе транспортно-логистического маршрута доставки груза необходимо учитывать ряд факторов, такие как географическое положение поставщика и получателя, вид продукции, наличие терминалов, доступность инфраструктуры, подходов ж/д путей к морским портам экономическую целесообразность и др.

Кроме этого, определяя оптимальный вариант в системе доставки экспортных грузов следует применять принципы логистики для организации технологического процесса и определения перечня издержек грузовладельцев при транспортировке грузов в комбинированном сообщении с участием внутреннего водного транспорта.

Для обоснования комбинированных транспортно-логистических схем доставки минеральных удобрений через терминалы портов МТК «Север-Юг» автором статьи будут проведены расчеты стоимости доставки и сравнительный анализ полученных результатов на основе методики определения стоимостных показателей для выбора оптимального маршрута перевозки груза [9].

Рассмотрим возможные варианты схем доставки минеральных удобрений из Тольятти до Индии в комбинированном сообщении: через порты Балтийского, Азово-Черноморского и Каспийского бассейнов. На основе анализа маршрутов грузопотоков минеральных удобрений на экспорт и перевалки через терминалы российских портов были определены три основные транспортно-логистических схемы доставки груза из России в Индию. Варианты схем доставки минеральных удобрений из порта Тольятти до порта Индии представлены на (рис.3).

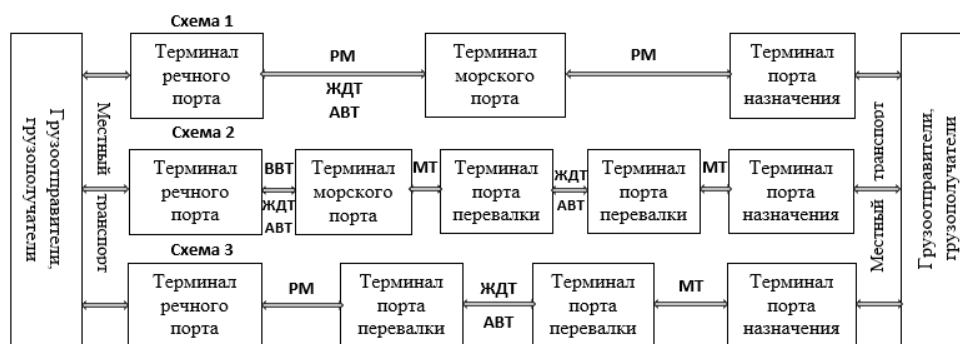


Рис. 4. Транспортно-логистические схемы доставки минеральных удобрений из Тольятти до Индии через терминалы портов Новороссийска, Астрахани, Ирана

Условные обозначения:

ВВТ - внутренний водный транспорт;

ЖДТ - железнодорожный транспорт;

АВТ - автомобильный транспорт;

МТ - морской транспорт;

РМ – река-море.

Для оценки и сравнения рассмотрим варианты схем доставки карбамида в 40-футовых контейнерах из Тольятти разными видами транспорта в комбинированном сообщении, с перевалкой в терминалах морских портов.

Схема 1 – порт Тольятти – погрузка на судно «река-море», вагон или автомобиль – доставка груза до порта Новороссийск – перевалка на морское судно – доставка в порт Индии. Из порта Тольятти возможна прямая доставка водным транспортом до порта Индии.

Схема 2 – порт Тольятти – погрузка на речное судно, вагон или автомобиль – доставка груза до порта Астрахани – перевалка на морское судно – доставка до порта Энзели (Иран) – перевалка на железнодорожный или автомобильный транспорт – доставка до морского порта Бендер-Аббас – перевалка на морское судно – доставка в порт Индии.

Схема 3 – порт Тольятти – погрузка на судно «река-море» – доставка до порта Энзели – перевалка на железнодорожный или автомобильный транспорт – доставка до морского порта Бендер-Аббас – перевалка на морское судно – доставка в порт Мундра (Индия).

В рассматриваемых схемах доставки в расчетах будут использованы тарифные ставки транспортных компаний, поэтому стоимость перевозки условно приближенная и не включает в себя дополнительные услуги, например обслуживание на терминале, таможенное оформление, страховка, взвешивание и т.п.

Минеральные удобрения из России в Индию в основном доставляются в 20 и 40 футовых контейнерах. 40-футовые контейнеры 40НС используются для экспорта грузов, они более эффективны для массовых грузоперевозок, так как большая вместимость позволяет снизить стоимость на единицу товара при перевозке больших объемов.

За исходные данные возьмем партию карбамида производства ПАО «Тольяттиазот» массой груза (Qгр) 5000 тонн. Стоимость сухогрузного морского 40 футового (40НС) контейнера – 150000 руб., вес груза в контейнере 40НС - 28550 кг. Для расчетов примем 175 ед. контейнеров. На железнодорожном транспорте для перевозки крупнотоннажных контейнеров подойдет вагон-платформа модель 13-6851-01 с грузоподъемностью 80 тонн, на автомобильном транспорте - тягач MAN с полуприцепом-контейнеровозом, на водном транспорте - многоцелевое сухогрузное

судно проекта 005RSD03 с контейнеровместимостью судна 105 FEU и 225 шт. TEU, предназначенное для морской и смешанной (река-море) перевозки грузов, в том числе контейнеров международного образца. Судно имеет относительно небольшие осадки – в море 4,50 м. и в реке 3,50 м., что позволяет ему работать у портов с ограниченными путевыми условиями.

Для удобства расчетов и сравнения стоимость доставки (Сдг), будут учитываться только показатели погрузки-разгрузки (Спрр), перевалки в порту С(пер), перевозки груза (Смаг) и грузовой массы в пути С(гп), без учета таможенных, экспедиторских и других дополнительных операций.

Формализованно стоимость доставки груза будет выглядеть следующим образом:

$$\text{Сдг} = \text{Спрр} + \text{Смаг} + \text{Спер} + \text{Сгр}, \text{ руб.}$$

Для примера, приведем расчет по схеме Тольятти – Астрахань – Иран – Индия. При расчете стоимости перевозки карбамида в контейнерах учитывались тарифы за погрузочно-разгрузочные работы (Спрр): для внутреннего водного транспорта взят тариф за услуги контейнерного терминала Тольяттинского логистического комплекса «Модуль»²³; за погрузку-выгрузку 40-футовых контейнеров на ж/д транспорте по прейскуранту ОАО «РЖД»; Спрр - авто ООО «ТрасАвтоЦисцерна»²⁴; ставка за перевозку (Смаг) партии перевозимого груза (Qгр) (175 контейнеров) и расстояние (Lмаг) будут учтены при расчете стоимости перевозки на железнодорожным, автомобильным и водным транспортом через цифровые логистические платформы мультимодальных перевозок²⁵. Расчет стоимости доставки груза водным транспортом выполнен с учетом ставок ПРР и морского фрахта экспедиторской компании «Группы Компаний ВТС» по направлению доставки груза из Астрахани в Энзели (Иран)²⁶. Стоимость грузовой массы в пути включает в себя партию груза, стоимость груза, банковский процент (Сб) и срок доставки Тдг. С учетом множества критериев для автоматизации расчетов и остальные вычисления выполняются в программе Excel. По методике определения оптимального варианта доставки минеральных удобрений, были произведены расчеты транспортно-логистических схем доставки груза в комбинированных сообщениях. На основании используемых данных по стоимости и тарифам транспортных компании были получены итоги расчетов, результаты которых приведены на рис.5.

Пример расчетов стоимости доставки карбамида в контейнерах по схеме Тольятти – Астрахань – Энзели (Иран) – Мундра (Индия) приведен ниже.

Стоимость доставки груза из порта Тольятти в порт Астрахани – (речной транспорт):

$$\text{Спрр(ввт)} = 17273 \times 175 = 3022775 \text{ руб.},$$

$$\text{Смаг(ввт)} = 247000 \times 175 = 43225000 \text{ руб.},$$

$$\text{Сгм(ввт)} = 175 \times 150000 \times 0,20 \times 6 / 100 \times 365 = 863,013 \text{ руб.},$$

$$\text{Сдг(ввт)} = 3022775 + 43225000 + 863,013 = 46248638 \text{ руб.},$$

Аналогичным способом рассчитывается стоимость доставки груза из порта Астрахань в порт Энзели (морской транспорт):

$$\text{Сдг(мт)} = 5950000 + 22120000 + 1006,849 = 28071006 \text{ руб.}$$

Стоимость доставки груза из порта Тольятти в порт Энзели (судно «река-море») без и с перевалкой на терминале порта Астрахань:

$$\text{Сдг(рм)} = 46248638 + 22121006 = 68370507 \text{ руб.},$$

$$\text{Сдг(ввт,мт)} = 46248638 + 28071006 = 74320507 \text{ руб.}$$

²³ Информационный сайт ТЛК «Модуль» URL: <https://www.modultlc.ru/>

²⁴ Информационный сайт ООО «ТрасАвтоЦисцерна» URL: <https://tolyatti.трансавтоцисцерна.рф/kalkulyator-perevozki-gruza/>

²⁵ Информационный ресурс URL: <https://agorafreight.com/stoimost-dostavki/dostavka-konteynerov-iz-bender-abbasa-v-mundra/>

²⁶ Информационный сайт URL: «Группы Компаний ВТС» <https://vts-group.ru/calc/>

Стоимость доставки из порта Энзели до порта Мундра (автомобильный, морской транспорт):

$$\text{Сдг(авто,мт)} = 284400 \times 175 + 2013,698 = 49772013 \text{ руб.}$$

Стоимость доставки из порта Тольятти до порта Энзели через Иран до порта Мундра (судно «река-море», автомобильный, морской транспорт) с и без перевалки на терминале порта Астрахань: $\text{Сдг(ввт,мт,авт,мт)} = 124092377 \text{ руб.}$, $\text{Сдг(рм,авт,мт)} = 118142377 \text{ руб.}$

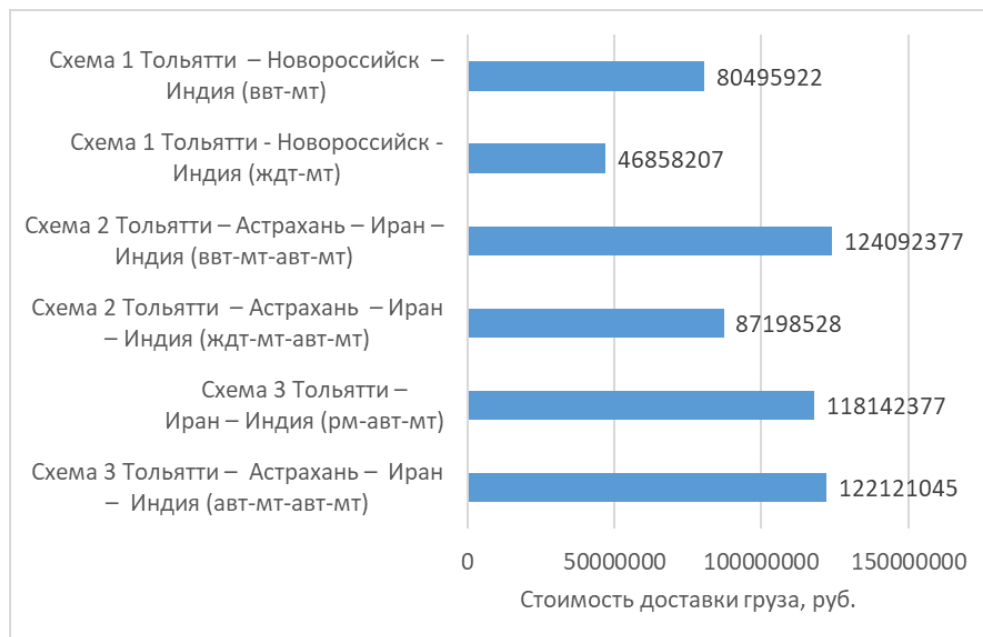


Рис. 5. Стоимость перевозки карбамида в контейнерах по трем комбинированным ТЛС доставки из Тольятти в Индию, с учетом качественных параметров, руб.

Обсуждение

По результатам исследования и анализа состояния терминальной инфраструктуры портов по перевалке минеральных удобрений выявлено, что основные специализированные терминалы находятся в портах Балтики, где отмечается положительная динамика объемов перевалки грузов, что нельзя сказать про терминалы Южных портов страны. Наблюдается нехватка специализированных терминалов, а также ограничение пропускной способности железной дороги, недостаточно развиты автомобильные подходы к портам, что негативно сказывается на объемах грузоперевозок.

Речные порты по перевалке удобрений практически отсутствуют, на причалах портов в основном обслуживаются нерудные и строительные грузы, черные металлы. Порты, которые осуществляют перевалку минеральных удобрений, имеют минимальные объемы из-за отсутствия соответствующей терминальной инфраструктуры, портовых и складских мощностей. Инфраструктурные проблемы внутреннего водного транспорта усложняют прохождение судов по внутренним водным путям из-за затянувшегося строительства и восстановления гидротехнических и причальных сооружений, что препятствует его эффективной работе. Тем не менее, потенциал развития инфраструктуры ВВТ и речных портов может обеспечить необходимый объем перевозки удобрений в комбинированном сообщении и доставки их на внешние рынки по МТК «Север-Юг».

На основании выполненного анализа и расчетов определено, что на стоимость доставки груза влияет дальность и сложность маршрута, количество операций, выполняемых в процессе доставки груза, вид и способ транспортирования, количество перевалок с одного вида транспорта на другой, инфраструктурные возможности терминала, скорость обработки судна в порту и время в пути. По стоимости доставки груза оптимальными являются комбинированные железнодорожно-водные маршруты, где тарифы на погрузо-разгрузочные работы и перевозку груза на ж/д ниже, чем на автомобильном транспорте. Такой вариант доставки эффективен при условиях обеспечения пропускной способности железной дороги. Стоимость доставки груза по транспортно-логистической схеме Тольятти-Астрахань-Иран-Индия с перевалкой в порту Астрахани самая дорогостоящая и оптимальным вариантом будет доставка удобрений в контейнерах из порта Тольятти судном «река-море» плавания без перевалки в порту Астрахани по водному маршруту до морского порта Ирана с дальнейшей доставкой через Иран в Индию.

Заключение

Основная проблема внутреннего водного транспорта – это сезонность, которая напрямую влияет на работу речных портов, что не должно ограничивать их деятельность, так как они могут быть центрами комбинированных перевозок, служить перевалочными пунктами для перегрузки грузов, накапливать и хранить грузы, обеспечивать взаимодействие между железнодорожным, автомобильным и водным транспортом. Решением некоторых проблем ВВТ может стать создание универсальных грузовых хабов на перекрестке как морских, так и внутренних водных торговых путей. Это особенно важно в период модернизации инфраструктуры водных путей и каналов при совместных усилиях России с Ираном и Индией в рамках реализации проекта развития МТК «Север-Юг».

Список литературы

1. Иванова А. Проблемы экспорта российских удобрений // Морские порты = Sea ports : информационно-аналитический журнал. – 2023. - № 7 (218). - Москва, 2023. – 64с. URL: <https://morvesti.ru/analitika/1691/105972/> (дата обращения 18.04.2025)
2. Богачев, А.И. Российский рынок минеральных удобрений: особенности функционирования в новых реалиях и метаморфозы развития / А.И. Богачев, Л.Н. Дорофеева // Вестник аграрной науки. - 2022. - №3(96). - С. 78-92. URL: <https://rucont.ru/efd/793422> (дата обращения: 18.04.2025)
3. Дмитриева Т. Рост инвестиций, производства и внутреннего спроса // Морские порты = Sea ports : информационно-аналитический журнал. 2024, № 8 (229). — Москва, 2024. — 64 с. URL: <https://morvesti.ru/themes/1694/112898/> (дата обращения: 18.04.2025)
4. Пак, Е.В. «Новая логистика» экспорта калийных удобрений из Республики Беларусь /Е.В. Пак, Е.Д. Сорокина // «Мировое и национальное хозяйство». - №3(67). - 2024. https://mirec.mgimo.ru/upload/ckeditor/files/mirec-2024-03_pak-sorokina.pdf (дата обращения 18.04.2025)
5. Знатнов, С.С. К вопросу о пропуске международного транзита по территории России с использованием внутренних водных путей / С.С. Знатнов // Транспортное дело России. – 2016. - №1. - С. 43-145. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-propuske-mezhdunarodnogo-tranzita-po-territorii-rossii-s-ispolzovaniem-vnutrennih-vodnyh-putei/viewer> (дата обращения 18.04.2025)
6. Ермаков, С.В. Обоснование использования грузовых терминалов речных портов в международных транспортных коридорах (на примере коридора «Север – Юг») : Дис. ... канд. техн. наук : 05.22.19 : Н. Новгород, 2004. – 150 с. РГБ ОД, 61:04-5/3139
7. Цверов, В.В. Анализ условий расширения участия речного транспорта в перевозках зерновых культур по МТК «Север – Юг» // Научные проблемы водного транспорта, (76), 192-209. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi76.389> (дата обращения 18.04.2025)

8. Федеральное агентство морского и речного транспорта (Росморречфлот). URL: https://morflot.gov.ru/deyatelnost/napravleniya_deyatelnosti/portyi_rf/ (дата обращения 08.05.2025)
9. Ничипорук А.О., Гончарова Н.В. Определение стоимостных показателей для выбора логистической схемы доставки грузов с учетом качества и экологичности перевозки // Вестник РГТУ. Серия: Экономика. Управление. Право. - 2012. - № 12 (92). - С. 189-195.
10. Press Information Bureau (PIB). Strengthening India's Maritime Sector: Port Capacity Expansion and Inland Waterway Development (Ministry of Ports, Shipping and Waterways) URL: <https://www.pib.gov.in/PressNoteDetails.aspx?NoteId=151999&ModuleId=3> (дата обращения: 18.05.2025)
11. Kavirathna, C., Kawasaki, T., Hanaoka, S. et al. Transshipment hub port selection criteria by shipping lines: the case of hub ports around the bay of Bengal. J. shipp. trd. 3, 4 (2018). URL: <https://doi.org/10.1186/s41072-018-0030-5> (дата обращения: 18.05.2025)
12. Huber, S., Klauenberg, J. & Thaller, C. Consideration of transport logistics hubs in freight transport demand models. Eur. Transp. Res. Rev. 7, 32 (2015). <https://doi.org/10.1007/s12544-015-0181-5> (дата обращения: 18.05.2025)
13. Mark Buzinkay Reducing Costs with Better Port Terminal Operations. IDENTEC SOLUTIONS AG URL: <https://www.identecsolutions.com/news/port-terminal-operations> (дата обращения: 18.05.2025)

References

1. Ivanova A. Problemy ehksporta rossiiskikh udobrenii [Sea ports = Sea ports: information and analytical journal] Morskie porty = Sea ports: informatsionno-analiticheskii zhurnal [Sea ports = Sea ports: information and analytical journal], 2023, no. 7 (218), Moskva, 64 p. URL: <https://morvesti.ru/analitika/1691/105972/> (accessed 18.04.2025)
2. Bogachev, A.I. Rossiiskii rynek mineral'nykh udobrenii: osobennosti funktsionirovaniya v novykh realiyakh i metamorfozy razvitiya [Russian market of mineral fertilizers: features of functioning in new realities and metamorphoses of development] Vestnik agrarnoi nauki [Bulletin of Agrarian Science], 2022, no. (96), pp. 78-92. URL: <https://rucont.ru/efd/793422> (accessed: 18.04.2025)
3. Dmitrieva T. Rost investitsii, proizvodstva i vnutrennego sprosа [Growth of investment, production and domestic demand] Morskie porty = Sea ports: informatsionno-analiticheskii zhurnal [Sea ports = Sea ports: information and analytical journal], 2024, no. 8 (229), Moskva, 2024, 64 p. URL: <https://morvesti.ru/themes/1694/112898/> (accessed: 18.04.2025)
4. Pak E.V. «Novaya logistika» ehksporta kaliinykh udobrenii iz Respubliki Belarus' ["New logistics" of potash fertilizer export from the Republic of Belarus] «Mirovoe i natsional'noe khozyaistvo» ["World and national economy"], no. 3(67), 2024/ URL: https://mirec.mgimo.ru/upload/ckeditor/files/mirec-2024-03_pak-sorokina.pdf (accessed: 18.04.2025)
5. Znatnov S.S. K voprosu o propuske mezhdunarodnogo tranzita po territorii Rossii s ispol'zovaniem vnutrennikh vodnykh putei [On the issue of allowing international transit through the territory of Russia using inland waterways] Transportnoe delo Rossii [Transport business of Russia], 2016, no. 1, pp. 143-145. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-propuske-mezhdunarodnogo-tranzita-po-territorii-rossii-s-ispolzovaniem-vnutrennikh-vodnykh-putei/viewer> (accessed: 18.04.2025)
6. Ermakov, S.V. Obosnovanie ispol'zovaniya gruzovykh terminalov rechnykh portov v mezhdunarodnykh transportnykh koridorakh (na primere koridora «Sever – YuG») [Justification for the use of cargo terminals of river ports in international transport corridors (using the example of the North-South corridor)]: Dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.22.19: [dis. ...cand. tech. Sciences: 05.22.19:] N. Novgorod, 2004, 150 p. RGB OD, 61:04-5/3139
7. Tsverov, V.V. Analiz uslovii rasshireniya uchastiya rechnogo transporta v perevozkakh zernovykh kul'tur po MTK «Sever – YuG» [Analysis of the conditions for expanding the participation of river transport in the transportation of grain crops along the North-South ITC] Nauchnye problemy vodnogo transporta [Scientific problems of water transport], (76), pp. 192-209. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi76.389> (data obrashcheniya 18.04.2025)
8. Federal'noe agentstvo morskogo i rechnogo transporta (Rosmorrechflot) [Federal Agency for Maritime and River Transport (Rosmorrechflot)] URL:

- https://morflot.gov.ru/deyatelnost/napravleniya_deyatelnosti/portyi_rf/ (accessed: 08.05.2025)
9. Nichiporuk A.O., Goncharova N.V. Opredelenie stoimostnykh pokazatelei dlya vybora logisticheskoi skhemy dostavki грузов s uchetom kachestva i ehkologichnosti perevozki [Determination of cost indicators for choosing a logistics scheme for cargo delivery, taking into account the quality and environmental friendliness of transportation], Vestnik RGGU. Seriya: Ehkonomika. Upravlenie. Pravo [Bulletin of the Russian State University. Series: Economics. Management. Right]. 2012. no. 12 (92). pp. 189-195.
 10. Press Information Bureau (PIB). Strengthening India's Maritime Sector: Port Capacity Expansion and Inland Waterway Development (Ministry of Ports, Shipping and Waterways) URL: <https://www.pib.gov.in/PressNoteDetails.aspx?NoteId=151999&ModuleId=3> (accessed: 18.05.2025)
 11. Kavirathna, C., Kawasaki, T., Hanaoka, S. et al. Transshipment hub port selection criteria by shipping lines: the case of hub ports around the bay of Bengal. J. shipp. trd. 3, 4 (2018). URL: <https://doi.org/10.1186/s41072-018-0030-5> (data obrashcheniya: 18.05.2025)
 12. Huber, S., Klauenberg, J. & Thaller, C. Consideration of transport logistics hubs in freight transport demand models. Eur. Transp. Res. Rev. 7, 32 (2015). <https://doi.org/10.1007/s12544-015-0181-5> (accessed: 18.05.2025)
 13. Sokrashchenie raskhodov za schet uluchsheniya raboty portovykh terminalov Mark Buzinkay Reducing Costs with Better Port Terminal Operations. IDENTEC SOLUTIONS AG URL: <https://www.identecsolutions.com/news/port-terminal-operations> (accessed: 18.05.2025)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Гончарова Наталья Владимировна, к.т.н.,
доцент кафедры логистики и маркетинга,
Волжский государственный университет
водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»),
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5,
e-mail: kafedra-lim@yandex.ru

Natalia V. Goncharova, Ph. D., Associate
Professor of the Department of Logistics and
Marketing, Volga State University of Water
Transport, 5, Nesterovst, Nizhny Novgorod,
603951

Уртминцев Юрий Николаевич, д.т.н.,
профессор, заведующий кафедрой
управления транспортом, Волжский
государственный университет водного
транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951,
г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-
mail: yurtm@yandex.ru

Yuriy N. Urtmintsev, Doctor of Engineering
Science, Professor of the Transport
Management Department, Volga State University
of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny
Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 09.06.2025; опубликована онлайн 20.09.2025.
Received 09.06.2025; published online 20.09.2025.

УДК 656.62.052

DOI: 10.37890/jwt.vi84.638

Оценка безопасности маневрирования судов в системах водных путей по относительному навигационному риску

П.А. Костин

Е.В. Богатырева

ORCID: 0000-0002-3530-9898

М.Э. Киселевич

Керченский государственный морской технологический университет, г. Керчь, Россия

Аннотация. Принимая во внимание стремительные темпы развития судоходства, безопасность навигации привлекает все большее внимание как научных, так и промышленных кругов. Однако традиционные подходы, основанные на статичных методах, не всегда дают достоверные результаты, а методы, позволяющие проводить анализ в режиме реального времени, ограничены коротким прогнозным горизонтом. В связи с этим, цель статьи заключается в рассмотрении особенностей оценки безопасности маневрирования судов в системах водных путей по относительному навигационному риску. Методы исследования: моделирование, систематизация, обобщение, группировка, синтез. В процессе исследования для анализа навигационного риска предложен алгоритм, который основан на комбинации процесса нечеткой аналитической иерархии и облачной модели. В рамках алгоритма выделены и подробно описаны три взаимосвязанных этапа: создание системы индексов навигационного риска для оценки безопасности маневрирования судов, экспертная оценка факторов риска, построение облачной модели для комбинации качественных и количественных оценок риска. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что предложенный алгоритм способен описать процесс распространения риска и ключевых факторов, оказывающих на него влияние, в судовых навигационных системах.

Ключевые слова: навигация, риск, модель, оценка, облако, маневр, судно, матрица

Assessing ship manoeuvring safety in waterway systems by relative navigational risk

Pavel A. Kostin

Elena V. Bogatyreva

ORCID: 0000-0002-3530-9898

Mikhail E. Kiselevich

Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russia

Abstract. Given the rapid pace of shipping development, the safety of ship navigation has attracted much attention from both academia and industry. However, traditional approaches based on static methods do not always give reliable assessment results, and real-time assessment methods are limited by a short forecast horizon. Therefore, the aim of the paper is to review the peculiarities of assessing the safety of ship manoeuvring in waterway systems by relative navigational risk. Research methods: modelling, systematisation, analysis, generalisation, grouping, synthesis. In the research process, an algorithm is proposed to analyse the navigation risk, which is based on the combination of fuzzy analytical hierarchy process and cloud model. Within the algorithm, three interrelated stages are identified and described in detail: creation of a system of navigation risk indices to assess the safety of ship manoeuvring, expert assessment of risk factors, and construction of a cloud model for the combination of qualitative and quantitative risk assessments. The obtained results allow us to

conclude that the proposed algorithm is able to describe the process of risk propagation of key factors influencing it in ship navigation systems.

Keywords: navigation, risk, model, estimation, cloud, manoeuvre, vessel, matrix

Введение

Безопасность маневрирования судов в системе водных путей обеспечивается соблюдением допустимых ограничений, называемых условиями безопасной эксплуатации. Данные условия устанавливают ключевые параметры «максимальных судов», которые могут с приемлемым уровнем риска маневрировать с учетом гидрометеорологических условий, характерных для определенного участка системы водных путей [1]. Международная морская организация разработала методы и концепции стандартизированной формальной оценки безопасности судоходства [2]. Однако, растущая сложность современных технологических систем и цифровых решений, поддерживающих навигацию, ставит перед учеными серьезные задачи.

Традиционные методы статической оценки не способны количественно определить процесс изменения динамического риска и его взаимосвязь с влияющими факторами, что приводит к невозможности точного и эффективного прогнозирования траектории развития и последствий навигационной ситуации. Метод моделирования в реальном времени, считающийся на сегодняшний день самым передовым и точным, недостаточен в ряде аспектов анализа рисков, особенно при расширении исследований на более длительный период времени и детальном прогнозировании последствий [3].

С учетом вышеизложенного, обновление и совершенствование существующих методов оценки безопасности судоходства, а также повышение применимости и точности методов оценки навигационного риска, составляет важную научно-практическую задачу, которая и предопределила выбор темы данной статьи.

Над разработкой подхода, который основан на системной методологии проектирования водных путей, трудятся Ke Zhang, Liwen Huang [4], Jianan Luo, Xiongfei Geng [5], Жук А.С [6]. Методы оценки навигационного риска, использующие логические рассуждения, включая анализ дерева неисправностей, байесовский анализ, теорию вероятности, рассматривают Некрасов С.Н. [7], Jonghwi Kim, Changyu Lee [8].

В тоже время, несмотря на накопленное научное наследие, некоторые вопросы требуют более детальной проработки. Так, в уточнении нуждается алгоритм локального реактивного обхода препятствий для высокоскоростных судов на основе модели устойчивого состояния направления и модели трансляционной скорости. Особого внимания заслуживают новые методы, такие как, нейронно-эволюционные системы, многоцелевые алгоритмы оптимизации роя частиц для анализа навигационного риска.

Методы исследования: системный анализ, моделирование, обобщение, группировка, синтез.

Итак, **цель статьи** можно сформулировать следующим образом - рассмотреть особенности оценки безопасности маневрирования судов в системах водных путей по относительному навигационному риску.

Результаты

Факторы риска безопасности маневрирования судов характеризуются сложностью и неоднозначностью. Для оценки безопасности маневрирования судов в системах водных путей предлагаем использовать алгоритм, который основан на комбинации процесса ФАНР (нечеткая аналитическая иерархия) и облачной модели. ФАНР определяет весовое значение каждого фактора навигационного риска, далее для количественного расчета риска используется облачная модель, которая позволяет

оценить влияние отдельных факторов и определить относительный навигационный риск.

Схематически предложенный алгоритм представлен на рисунке 1.

Согласно рис. 1 алгоритм предполагает прохождение трех взаимосвязанных этапов:

(1) Создание системы индексов навигационного риска для оценки безопасности маневрирования судов.

(2) Экспертная оценка факторов риска путем попарного сравнения, на основании чего строится матрица суждений. Расчет весовых значений факторов риска первого и второго уровня с помощью нечеткой аналитической иерархии.

(3) С использованием метода расчета облачной модели, которая позволяет комбинировать качественные и количественные оценки, рассчитывается объективная оценка относительного навигационного риска.

Рассмотрим каждый из выделенных этапов более подробно.



Рис. 1. Алгоритм оценки риска безопасности маневрирования судна (разработано автором)

Создание системы индексов навигационного риска для оценки безопасности маневрирования судов. Основываясь на данных о рисках, характерных для различных типов водных путей, каждый из которых связан с определенным маневром, можно предложить следующую классификацию аварий:

1) Проход по прямому одностороннему фарватеру: наезд на портовое сооружение, посадка на мель (уклон канала), наезд на судно, которое пришвартовано у фарватера.

2) Швартовка в портовом бассейне: удар о портовое сооружение (вертикальный берег), посадка на мель, удар в судно, которое пришвартовано у причала.

3). Поворот в обозначенном районе: столкновение с судном, которое пришвартовано в районе поворота, удар о портовое сооружение, посадка на мель (уклон канала).

4) Поворот на изгибе фарватера: столкновение с портовым сооружением, посадка на мель.

5). Проход по прямому двухстороннему фарватеру: столкновение с судном, которое идет по встречному курсу, посадка на мель (уклон канала), столкновение с судном, ошвартованным на фарватере, удар о портовое сооружение.

Согласно определению относительного навигационного риска (R_N), риск, исходящий от факторов A_i (объектов) и равный 0, означает полную безопасность навигации относительно этих факторов (объектов). Аналогично, чем выше риск (параметр R_N приближается к 1), тем ниже уровень безопасной навигации (S_N) $\rightarrow (R_N + S_N = 1; S_N = 1 - R_N)$. Таким образом, показатель навигационного риска, достигающий $R_N = 1$, означает возникновение таких условий и/или обстоятельств, которые будут препятствовать безопасному плаванию и могут повлечь за собой 100% вероятность столкновения.

На рис. 2 представлена система индексов риска судоходства.



Рис. 2. Система индексов навигационного риска

Экспертная оценка факторов риска. В рамках данного этапа предлагается использовать метод треугольного нечеткого числа для представления нечетких сравнительных суждений экспертов. Треугольное нечеткое число в большей степени подходит для экспертного суждения, которое является неоднозначным (минимальное значение, наиболее вероятное значение и максимальное значение) [4]. Треугольное число может быть представлено следующим образом:

$$P = (l, \mu, m)$$

Параметр l является минимальным значением, μ - наиболее вероятное значение, а параметр m - максимальное значение. Функция принадлежности $M(\mu)$ определяется по такой формуле:

$$\mu(x|M) = \begin{cases} 0 & (x < l) \\ \frac{x-l}{m-l} & (l \leq x \leq m) \\ \frac{m-x}{m-\mu} & (m \leq x \leq \mu) \\ 0 & (x \geq \mu) \end{cases}$$

Матрица суждений $F_{n \times n}$ с отношением интервальных значений имеет такой вид:

$$F_{n \times n} = \begin{bmatrix} 1 & L & P_{1n} \\ M & O & M \\ P_{n1} & L & 1 \end{bmatrix}$$

P_{1n} представляет собой отношение интервального значения для первого фактора и интервального значения для n -го фактора; P_{n1} – это обратная величина от P_{1n} .

Расчет облачной модели. Облачная модель используется для расчёта объективной оценки навигационного риска, влияющего на безопасность маневрирования судов при различных сценариях. Формула, используемая для измерения показателей факторов риска судовой навигационной системы, представлена следующим образом:

$$E_x = (B_{max} + B_{min})/2, \quad E_n = (B_{max} + B_{min})/6 \quad H_e = kE$$

где B_{max} и B_{min} - максимальное и минимальное значения переменных факторов риска; K - коэффициент нормализации.

Пусть M - область, а факторы риска системы навигации судна y , $y \in M$, y - случайная величина, степень принадлежности y к M выражается как $m(y) \in [0, 1]$. Тогда стабильное случайное число имеет вид:

$$m: M \rightarrow [0,1]$$

$$\forall: y \in M, y \rightarrow m(y)$$

В приведенной выше формуле y — это облако распределения на M , и каждое y соответствует единице облака. Модель облака может быть поделена на прямое и обратное облако. В прямую облачную модель импортируется каждый фактор риска в системе навигации судна. Для создания облачной модели используются следующие шаги:

1) Генерация случайного числа, где E_n - ожидаемое значение, а H_e - стандартное отклонение E_n :

$$f_{En'}(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi H_e}} \exp \left[-\frac{(y - E_n)^2}{2H_e^2} \right]$$

2) Генерация случайного числа y , где E_n' - стандартное отклонение, а E_x - ожидаемое:

$$f_y(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi[0,1]|En'|}} \exp \left[-\frac{(y - E_y)^2}{2En'^2} \right]$$

Функция Y характеризуется как:

$$f_y(y) = f_{En'}(y) \times f_y(y|En'') = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2\pi H_e |y|} \exp \left[-\frac{(y - E_y)^2}{2x^2} - \frac{(x - E_n)^2}{2H_e^2} \right] dx$$

3) Вывод:

$$x = \exp \left[-\frac{(y - E_y)^2}{2(En')^2} \right]$$

Измеренные данные судовождения подставляются в функцию принадлежности. В итоге получается степень членства d_{mn} m -го параметра индекса в уровне риска судовождения n .

Заключение

В статье представлен алгоритм оценки безопасности маневрирования судов в системе водных путей, использующий концепцию относительного навигационного риска. Предложенный алгоритм объединяет процесс нечеткой аналитической

иерархии и облачной модели. Благодаря этому он способен описать процесс распространения ключевых факторов риска в судовых навигационных системах. Относительный навигационный риск может быть использован при оценке и сравнении различных условий безопасной эксплуатации судов.

Список литературы

1. Горячев И.С. Исследование потери управляемости судна для обеспечения безопасного маневрирования // Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России. 2022. № 3 (155). С. 11-14.
2. Цыбуля А.Д. Разработка архитектуры и протокола системы обмена информацией между безэкипажным судном и центром дистанционного управления для передачи виртуальной разметки // Столыпинский вестник. 2022. Т. 4. № 5. С. 12-19.
3. Панькина С.М. Идентификация и анализ риска как фактора повышенной безопасности в судовождении // Эксплуатация морского транспорта. 2023. С. 79-86.
4. Ke Zhang, Liwen Huang Collision Avoidance Method for Autonomous Ships Based on Modified Velocity Obstacle and Collision Risk Index // Journal of Advanced Transportation. 2022. Volume 20, Issue 1. P. 34-39.
5. Jianan Luo, Xiongfei Geng Study on the Risk Model of the Intelligent Ship Navigation // Wireless Communications and Mobile Computing. 2022. Volume 4, Issue 11. P. 12-19.
6. Жук А.С. Метод оценки безопасности маневра судна на ограниченном горизонте планирования // Эксплуатация морского транспорта. 2024. № 3 (112). С. 3-9.
7. Некрасов С.Н. Современные методы идентификации моделей областей навигационной безопасности // Навигация и гидрография. 2023. № 72. С. 12-24.
8. Jonghwi Kim, Changyu Lee Field experiment of autonomous ship navigation in canal and surrounding nearshore environments // Journal of Field Robotics. 2023, Issue 2. P. 45-51.

References

1. Gorjachev I.S. Issledovanie poteri upravljajemosti sudna dlja obespechenija bezopasnogo manevrirovaniya [Study of loss of vessel controllability to ensure safe maneuvering], *Oboronnyj kompleks - nauchno-tehnicheskomu progressu Rossii* [Defense complex - to scientific and technical progress of Russia], 2022, no. 3 (155), pp. 11-14.
2. Cybulja A.D. Razrabotka arhitektury i protokola sistemy obmena informaciej mezhdru bezjkipazhnym sudnom i centrom distancionnogo upravlenija dlja peredachi virtual'noj razmetki [Development of architecture and protocol of information exchange system between unmanned vessel and remote control center for transmission of virtual markings], *Stolypinskij vestnik* [Stolypin Bulletin], 2022. no. № 5, pp. 12-19.
3. Pan'kina S.M. Identifikacija i analiz riska kak faktora povyshennoj bezopasnosti v sudovozhdenii [Identification and analysis of risk as a factor of increased safety in navigation], *Jekspluatacija morskogo transporta* [Operation of sea transport], 2023, pp. 79-86.
4. Ke Zhang, Liwen Huang Collision Avoidance Method for Autonomous Ships Based on Modified Velocity Obstacle and Collision Risk Index. *Journal of Advanced Transportation*. 2022. Volume 20, Issue 1. pp. 34-39.
5. Jianan Luo, Xiongfei Geng Study on the Risk Model of the Intelligent Ship Navigation. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2022. Volume 4, Issue 11. pp. 12-19.
6. Zhuk A.S. Metod ocenki bezopasnosti manevra sudna na ogranichenom gorizonte planirovaniya [Method for Assessing the Safety of Vessel Maneuver on a Limited Planning Horizon], *Jekspluatacija morskogo transporta* [Operation of Marine Transport], 2024. no. 3 (112). pp. 3-9.
7. Nekrasov S.N. Sovremennye metody identifikacii modelej oblastej navigacionnoj bezopasnosti [Modern Methods for Identifying Models of Navigation Safety Areas], *Navigacija i gidrografija* [Navigation and Hydrography], 2023. no. 72. pp. 12-24.
8. Jonghwi Kim, Changyu Lee Field experiment of autonomous ship navigation in canal and surrounding nearshore environments. *Journal of Field Robotics*. 2023, Issue 2. pp. 45-51.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Костин Павел Андреевич, аспирант кафедры судовых энергетических установок «Керченский государственный морской технологический университет» (ФГБОУ ВО «КГМТУ»), 298309, Российская Федерация, Керчь, ул. Орджоникидзе, 82, arev_66@mail.ru

Pavel A. Kostin, Postgraduate student of the Department of Marine Power Plants, Kerch State Maritime Technological University, 82 Ordzhonykydze Str., Kerch, 298309, Russian Federation, e-mail: arev_66@mail.ru

Богатырева Елена Владимировна, к.т.н., доцент, доцент кафедры судовых энергетических установок «Керченский государственный морской технологический университет» (ФГБОУ ВО «КГМТУ»), 298309, Российская Федерация, Керчь, ул. Орджоникидзе, 82, arev_66@mail.ru

Elena V. Bogatyreva, PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Department of of marine power plants, Kerch State Maritime Technological University, 82 Ordzhonykydze Str., Kerch, 298309, Russian Federation, e-mail: arev_66@mail.ru

Киселевич Михаил Эдуардович, курсант специальности Эксплуатация судовых энергетических установок «Керченский государственный морской технологический университет» (ФГБОУ ВО «КГМТУ»), 298309, Российская Федерация, Керчь, ул. Орджоникидзе, 82, arev_66@mail.ru

Mikhail E. Kiselevich, student of the Ship Power Plants Operation specialty, Kerch State Maritime Technological University, 82 Ordzhonykydze Str., Kerch, 298309, Russian Federation, e-mail: arev_66@mail.ru

Статья поступила в редакцию 05.08.2025; опубликована онлайн 20.09.2025.
Received 05.08.2025; published online 20.09.2025.

УДК 629.12.001.2

DOI: 10.37890/jwt.vi84.641

Сравнительный анализ моделей краткосрочного прогнозирования погоды для систем автономного наблюдения

А.А. Приваленко

Сибирский государственный университетского водного транспорта, Новосибирск, Россия

Аннотация. В условиях ограниченных вычислительных ресурсов задача краткосрочного прогнозирования погоды (температуры, давления, силы и направления ветра) решается с использованием различных методов. В данной работе, на основе данных автономной метеостанции, сравниваются три подхода: наивная модель, регрессионные модели (Хольт и линейная регрессия) и нейросеть LSTM, для прогнозов на 24 и 72 часа. Результаты показывают, что экспоненциальное сглаживание обеспечивает наилучший баланс между точностью и вычислительными затратами, в то время как нейросетевой подход LSTM, при наличии достаточных ресурсов, позволяет достичь максимальной точности прогнозов.

Ключевые слова: гидрометеорологическое обеспечение, метеокomплекс, судоходство, навигация, погодные условия, безопасность судоходства, автоматизированный мониторинг, численные модели прогнозирования

Comparative analysis of short-term weather forecasting models for autonomous observation systems

Alexey A. Privalenko

Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia

Abstract. Under conditions of limited computational resources, the task of short-term weather forecasting (temperature, pressure, wind speed, and direction) is addressed using various methods. This work compares three approaches—naive model, regression models (Holt's and linear regression), and the LSTM neural network—based on data from an autonomous weather station, for 24- and 72-hour forecasts. Results indicate that exponential smoothing provides the best balance between accuracy and computational efficiency, while the LSTM neural network approach achieves the highest forecast accuracy when sufficient resources are available.

Keywords: Hydrometeorological support, meteorological complex, shipping, navigation, weather conditions, safe navigation, automated monitoring, numerical forecasting models

Введение

В целях верификации результатов моделирования и сравнения эффективности краткосрочных моделей прогнозирования погодных условий был проведён цикл натурных наблюдений в городе Новосибирске в три различные даты — 10 апреля, 25 апреля и 10 мая 2025 года. Измерения осуществлялись в течение 4 часов на каждой сессии с частотой 1 раз в минуту, что позволило собрать по 240 наблюдений на каждую переменную в день.

Для измерений использовалась автоматизированная метеостанция на базе Arduino Mega 2560 с набором сертифицированных сенсоров: BMP280 (давление), DS18B20 (температура), анемометр и флюгер (ветровой режим) [11].

Для повышения эффективности систем оповещения на судах и береговых станциях метеонаблюдения были исследованы различные методы прогнозирования

метеорологических параметров. Регистрировались температура воздуха, атмосферное давление, скорость и направление ветра.

Краткосрочное прогнозирование

На основе этих данных были исследованы четыре модели прогнозирования с горизонтом 30 и 90 минут: персистентная (Persistent), модель экспоненциального сглаживания Хольта (Holt's Linear Trend), линейная регрессия (Linear Regression) и рекуррентная нейронная сеть LSTM (Long Short-Term Memory, реализованная в Python/Keras) [2]. Анализ точности прогнозирования ключевых параметров (температура воздуха, атмосферное давление, скорость и направление ветра) позволил сделать следующие основные выводы:

Низкая эффективность персистентной модели: Модель Persistent продемонстрировала значительное снижение точности в условиях, характеризующихся высокой вариабельностью метеорологических условий (особенно давления и ветра), что ограничивает ее практическую применимость для систем, требующих надежности.

Условная применимость модели Хольта и линейной регрессии: Модель Holt's Linear Trend показала удовлетворительные результаты при наличии устойчивых линейных тенденций в изменении параметров. Однако ее точность существенно снижалась при нелинейных динамиках и резких изменениях. Линейная регрессия, как и ожидалось, оказалась эффективной лишь в ограниченном числе случаев с выраженными краткосрочными линейными зависимостями.

Преимущество LSTM-модели: наиболее высокую точность и устойчивость на обоих тестируемых горизонтах (30 и 90 минут) продемонстрировала LSTM-модель. Ее ключевым преимуществом стала способность эффективно улавливать сложные нелинейные зависимости и краткосрочные паттерны в данных, особенно выраженная при прогнозировании резких колебаний атмосферного давления и ветрового режима. LSTM показала наименьшую среднюю абсолютную ошибку (MAE) и среднеквадратичную ошибку (RMSE) по большинству параметров в условиях изменчивой погоды.

В ходе исследования было установлено, что модели, способные адаптироваться к быстрым изменениям, имеют значительную практическую ценность. Среди рассмотренных моделей LSTM показала себя наиболее перспективной для интеграции в автоматизированные системы краткосрочного метеорологического оповещения судового и берегового базирования, превосходя модель Хольта, персистентную модель и линейную регрессию. LSTM-модель особенно эффективна в условиях высокой нестационарности данных, характерной для исследуемого региона, и является оптимальным решением для оперативного (до 90 минут) метеобеспечения судов и береговых станций. Модель Хольта может быть использована в качестве альтернативы при стабильной линейной динамике.

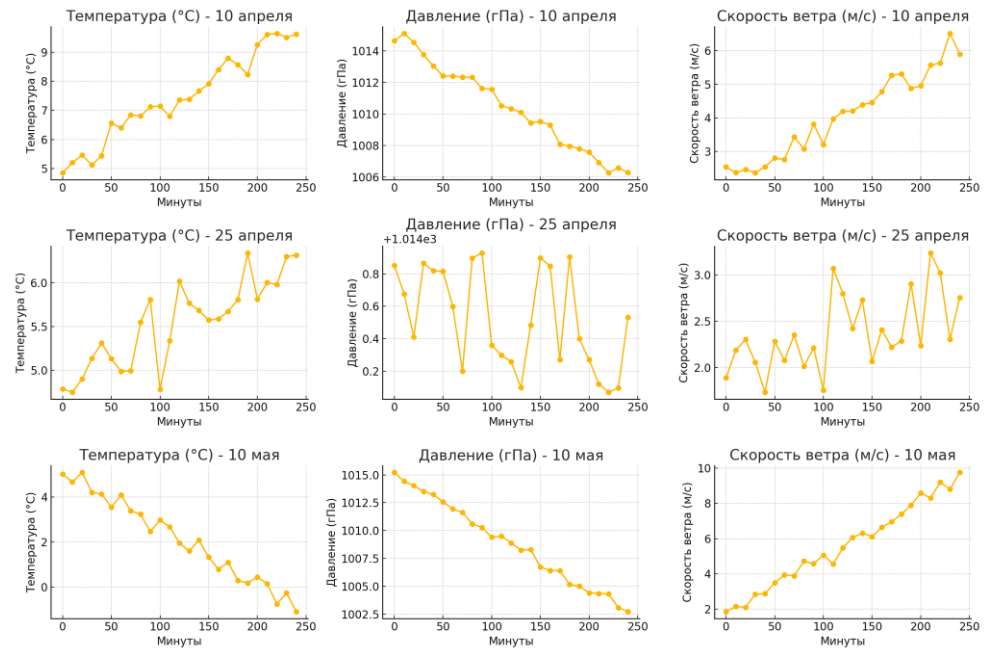


Рис. 1. Изменение параметров погоды по дням наблюдений

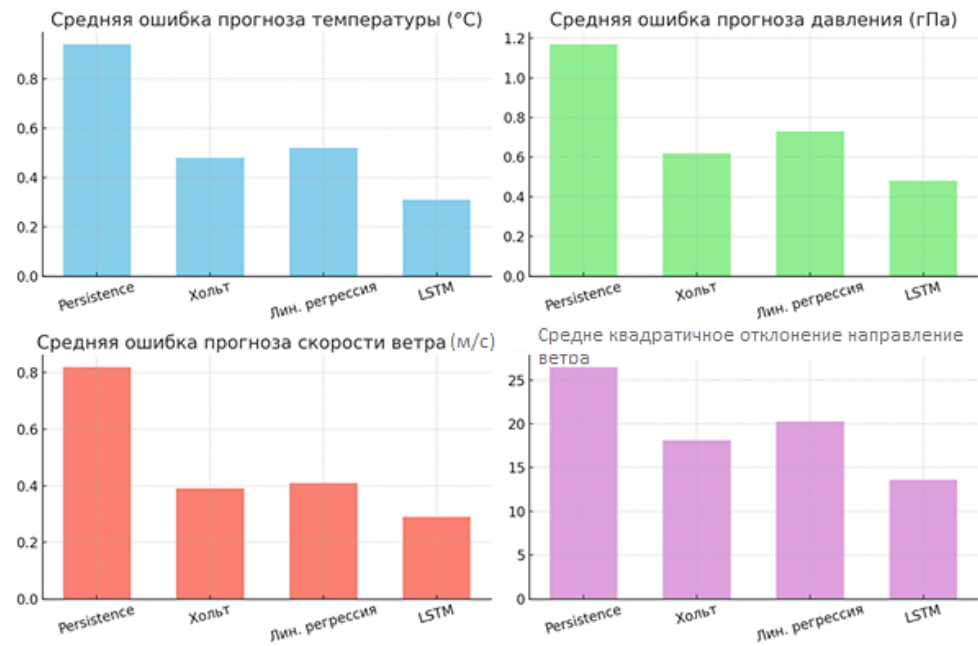


Рис. 2. Сравнительные ошибки прогнозных моделей

Анализ перспектив моделей для долгосрочного прогнозирования (24, 48, 72 часа)

Персистентная, Модель Хольта, Линейная регрессия абсолютно непригодны для прогноза на 1–3 суток. Их предположения (сохранение текущего состояния, линейный тренд) не имеют физического смысла на этом масштабе времени. Ошибка будет катастрофически расти.

Неспособность данной LSTM-модели генерировать физически осмысленные прогнозы на 24–72 часа обусловлена ее обучением исключительно на коротких, локальных данных. Отсутствие информации о крупномасштабных синоптических процессах, таких как циклоны и фронты, в ее архитектуре и обучающем наборе данных, делает невозможным адекватное предсказание погоды на среднесрочную перспективу. Экстраполяция ее работы неизбежно приведет к расхождению с реальностью.

Численные модели прогноза погоды (NWP) являются основным инструментом для предсказания атмосферных явлений [3, 8]. Они работают, решая уравнения, описывающие движение и теплообмен в атмосфере, на основе детальных начальных условий. Эти начальные условия формируются путем объединения (ассимиляции) данных, полученных из различных источников наблюдений.

Современные численные модели прогноза погоды (NWP), такие как GFS, ICON, WRF и COSMO, на данный момент являются наиболее точными инструментами для прогнозирования погоды на период от 3 до 7 дней [1, 5, 7]. Несмотря на то, что точность этих моделей снижается с увеличением срока прогноза, они значительно превосходят любые локальные статистические модели или модели машинного обучения (ML), которые используют данные только из одной точки.

В Западной Сибири, например, хорошо себя зарекомендовали глобальная модель GFS и региональные модели COSMO и WRF, адаптированные для моделирования мезомасштабных атмосферных процессов.

Перспективным направлением является разработка гибридных подходов, сочетающих NWP и ML [1, 7]. В частности, метод постобработки выходов NWP (MOS) позволяет использовать статистические модели или модели ML (включая сложные, такие как LSTM или графовые нейросети) для корректировки систематических ошибок NWP-моделей в конкретных местах (например, в городах или портах) [1, 3]. Эти модели обучаются на исторических данных прогнозов и наблюдений. Постобработка представляется наиболее эффективным способом повышения точности долгосрочных прогнозов в конкретной точке, основываясь на результатах текущего исследования.

Глобальные ML-модели прогнозирования погоды (например, FourCastNet, Pangu-Weather, GraphCast), обученные на данных переанализа и NWP, становятся конкурентоспособными по скорости и точности среднесрочных прогнозов [6]. Однако, их внедрение затруднено из-за высоких требований к вычислительным ресурсам и необходимости доступа к глобальным данным, что ограничивает их использование в локальных системах.

В продолжение проведённых полевых исследований в апреле и мае 2025 года была предпринята попытка экстраполяции погодных параметров на более длительные интервалы времени — 24, 48 и 72 часа. Целью эксперимента являлось оценить применимость и ограниченность краткосрочных моделей прогнозирования для задач средне- и долгосрочного прогноза в условиях дефицита данных и ограниченных вычислительных ресурсов.

Используя данные, полученные в каждом сеансе (240 точек), мы аппроксимировали и применили четыре модели для прогнозирования на 24, 48 и 72 часа - простейшую модель Persistence, линейную регрессию по времени, модель экспоненциального сглаживания Хольта и нейросеть LSTM, обученную для эмуляции данных. Оценка точности прогнозов проводилась с использованием средней

абсолютной ошибки и среднеквадратичной ошибки. Результаты обобщены в графической форме ниже.

Для краткосрочного прогнозирования (до 48 часов) можно использовать линейную регрессию или модель Хольта. Однако, при увеличении горизонта прогнозирования, наилучшие результаты показывает LSTM-модель, особенно в условиях нестабильной погоды. К сожалению, внедрение LSTM-модели в автономные системы ограничено из-за высоких требований к вычислительным ресурсам микроконтроллеров. Наивная модель показала себя наименее эффективной.

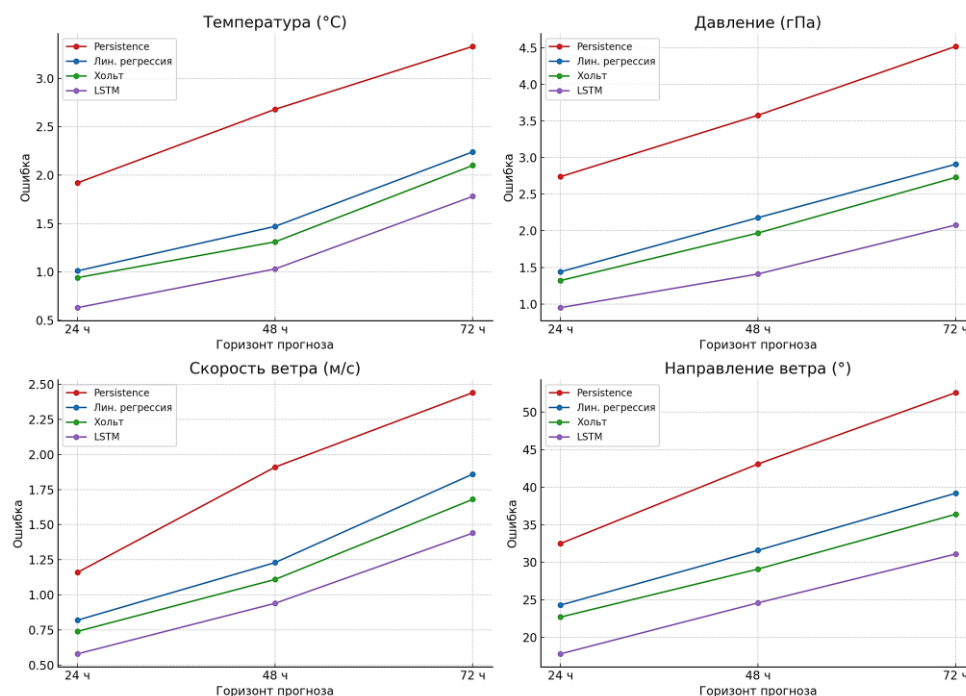


Рис. 3. Сравнительный анализ ошибок прогнозов на 24, 48 и 72 часа для различных моделей

Заключение

На основе сравнительного анализа кратко- и среднесрочных моделей прогнозирования для автономных систем наблюдения, были сформулированы следующие рекомендации для морских систем оповещения:

Краткосрочный прогноз (0–6 часов):

Для оперативного предупреждения о штормовых явлениях (ветер, давление, осадки) рекомендуется использовать LSTM-модели, обученные на данных местных метеостанций. LSTM эффективно обрабатывают нелинейные зависимости и учитывают локальные особенности атмосферы, что повышает точность прогноза на короткий период.

Среднесрочный прогноз (6–72 часа):

Прогноз должен основываться на результатах глобальных (GFS, ICON) и региональных (COSMO, WRF) численных моделей погоды (NWP) [1, 5, 7]. Для повышения точности прогнозов в важных морских районах (порты, фарватеры) рекомендуется использовать машинное обучение (ML) для постобработки (MOS) данных NWP [1, 3, 7]. Корректирующие модели (включая LSTM) следует обучать на

исторических данных, сравнивая прогнозы NWP с фактическими наблюдениями с местных станций.

Оптимальная система прогнозирования, как гибридный подход должна в себя включать модуль сверх краткосрочного прогноза (0–6 часов) на основе LSTM-моделей [2, 9], использующих локальные данные в реальном времени и модуль среднесрочного прогноза (6–72 часа), основанный на прогнозах NWP, обработанных с помощью ML.

Для обеспечения непрерывности и согласованности данных между модулями, а также для устранения резких переходов, необходимо использовать методы калибровки и сглаживания прогнозов.

Долгосрочный прогноз (24–72 часа и более):

Автономные статистические модели (Persistent, Хольта, линейная регрессия) и ML-модели (включая LSTM, обученные только на точечных данных) не подходят для самостоятельного прогнозирования из-за быстрого накопления ошибок и неучета крупномасштабных погодных процессов.

Единственный обоснованный подход - использование прогнозов NWP-моделей.

Для повышения точности долгосрочных предупреждений рекомендуется разрабатывать и внедрять специализированные ML-алгоритмы (включая LSTM) для постобработки данных NWP, чтобы корректировать их систематические ошибки для конкретных мест [3, 5, 8].

Исследование показало, что наиболее эффективный и точный прогноз погоды для обеспечения безопасности на море достигается при использовании гибридного подхода [1, 7]. Этот подход объединяет преимущества LSTM-моделей в сверхкраткосрочном прогнозе на основе локальных данных.

Список литературы

1. Кашин И.В., Степанов В.В. Применение машинного обучения в прогнозировании погоды: обзор // Оптика атмосферы и океана. – 2020. – Т. 33, № 5. – С. 471–478. – DOI: 10.1134/S1024856020050067
2. Хохрейтер С., Шмидхубер Й. Долгая краткосрочная память // Нейрокомпьютинг (Neural Computation). – 1997. – Т. 9, № 8. – С. 1735–1780. – DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735
3. Гнайтинг Т., Рафтери А.Е. Прогнозирование погоды с использованием ансамблевых методов // Наука (Science). – 2005. – Т. 310, № 5746. – С. 248–249. – DOI: 10.1126/science.1115255
4. Расп С., Притчард М.С., Жантин П. Глубокое обучение для представления субсеточных процессов в климатических моделях // Труды Национальной академии наук (Proc. Natl. Acad. Sci.). – 2018. – Т. 115, № 39. – С. 9684–9689. – DOI: 10.1073/pnas.1810286115
5. Букабара С.-А. и др. Глобальная система прогнозирования, разрешающая конвекцию, на основе машинного обучения // Бюллетень Американского метеорологического общества (Bulletin of the American Meteorological Society). – 2022. – Т. 103, № 1. – С. E100–E115. – DOI: 10.1175/BAMS-D-20-0224.1
6. Ван Р., У Т., Лю Х. GraphCast: Обучение искусственному среднесрочному глобальному прогнозированию погоды // Препринт arXiv. – 2023. – arXiv:2311.05558.
7. Би З., Ван Д., Линь Ю. Гибридная модель, сочетающая WRF и LSTM для прогнозирования погоды // Прикладные науки (Applied Sciences). – 2022. – Т. 12, № 6. – С. 2923. – DOI: 10.3390/app12062923
8. Любанин В.М. Модели и методы прогноза атмосферных процессов. – М.: Наука, 2019. – 328 с. (Оригинал на русском, оставлен без изменений)
9. Ишмухаметов И.И., Рахматуллин Ф.Х. Использование нейросетей для краткосрочного прогнозирования температуры воздуха // Вестник КГУ им. Н.А. Некрасова. – 2021. – № 3. – С. 102–108. (Оригинал на русском, оставлен без изменений)

10. Карпатне А. и др. Наукоемкая наука о данных: Новая парадигма научного открытия // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 2017. – Т. 29, № 10. – С. 2318–2331. – DOI: 10.1109/TKDE.2017.2720168
11. Приваленко А.А. Оптимизация навигации с использованием метеоконтекста нового поколения // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2025. — № 1. — С. 108–114. (Оригинал на русском, оставлен без изменений)

References

1. Kashin I.V., Stepanov V.V. Application of Machine Learning in Weather Forecasting: A Review // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2020. – Vol. 33, No. 5. – P. 471–478. – DOI: 10.1134/S1024856020050067
2. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory // Neural Computation. – 1997. – Vol. 9, No. 8. – P. 1735–1780. – DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735
3. Gneiting T., Raftery A.E. Weather Forecasting with Ensemble Methods // Science. – 2005. – Vol. 310, No. 5746. – P. 248–249. – DOI: 10.1126/science.1115255
4. Rasp S., Pritchard M.S., Gentile P. Deep learning to represent subgrid processes in climate models // Proc. Natl. Acad. Sci. – 2018. – Vol. 115, No. 39. – P. 9684–9689. – DOI: 10.1073/pnas.1810286115
5. Boukabara S.-A. et al. A Convection-Permitting Global Forecast System Based on Machine Learning // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2022. – Vol. 103, No. 1. – P. E100–E115. – DOI: 10.1175/BAMS-D-20-0224.1
6. Wang R., Wu T., Liu H. GraphCast: Learning Skillful Medium-Range Global Weather Forecasting // arXiv preprint. – 2023. – arXiv:2311.05558.
7. Bi Z., Wang D., Lin Y. A Hybrid Model Combining WRF and LSTM for Weather Forecasting // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12, No. 6. – P. 2923. – DOI: 10.3390/app12062923
8. Любанин В.М. Модели и методы прогноза атмосферных процессов. – М.: Наука, 2019. – 328 с.
9. Ишмухаметов И.И., Рахматуллин Ф.Х. Использование нейросетей для краткосрочного прогнозирования температуры воздуха // Вестник КГУ им. Н.А. Некрасова. – 2021. – № 3. – С. 102–108.
10. Karpatne A. et al. Theory-Guided Data Science: A New Paradigm for Scientific Discovery // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 2017. – Vol. 29, No. 10. – P. 2318–2331. – DOI: 10.1109/TKDE.2017.2720168
11. Privalenko A.A. Optimization of Navigation Using Next-Generation Weather Complex // Scientific Problems of Siberia and Far East Transport. — 2025. — No. 1. — P. 108–114. (Original in Russian, unchanged)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Приваленко Алексей Александрович – доцент кафедры Судовождения, Сибирский государственный университетского водного транспорта, ФГБОУ ВО СГУВТ 630099, Новосибирская область, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: a.a.privalenko@nsawt.ru

Alexey A. Privalenko – Associate Professor at the Department of Ship Handling, Siberian State University of Water Transport, SSGUWT 630099, Novosibirsk region, Novosibirsk, Shchetinkina Street, 33, e-mail: a.a.privalenko@nsawt.ru

Статья поступила в редакцию 10.07.2025; опубликована онлайн 20.09.2025.
Received 10.07.2025; published online 20.09.2025.

УДК 627.8:624.145.4

DOI: 10.37890/jwt.vi84.629

Исследования формы свободной поверхности потока, образующейся на сосредоточенном перепаде

Н. Н. Фомичева

ORCID: 0000-0003-1278-3199

О. В. Спиренкова

ORCID: 0000-0002-1401-189X

А. С. Тушина

ORCID: 0000-0001-5128-9383

Сибирский государственный университет водного транспорта, Новосибирск, Россия

Аннотация. Методика расчета разлома ледяных полей на сосредоточенном перепаде основывается на большой базе исходных данных, включая форму свободной поверхности потока и скорости перемещения льдин. Актуальность рассматриваемой темы не вызывает сомнений. В связи с чем возникает необходимость проведения серии лабораторных исследований, целью которых является описание свободной поверхности потока на перепаде. Разрушение ледяных полей и обеспечение успешного пропуска через гидроузлы возможно при создании системы «порог-водослив», в которой имеет место их взаимное влияние на формирование скоростей и свободной поверхности. В настоящее время нет надежных способов построения кривых свободной поверхности над порогом и водосливами.

В работе поставлены задачи по изучению влияния наличия сосредоточенного перепада на положение свободной поверхности потока и динамику движения льдин во время весеннего ледохода. Методы выполнения поставленных задач основываются на экспериментальных исследованиях. Лабораторные исследования по изучению движения льдин через сосредоточенный перепад проводились на специально созданной установке. При этом был выполнен подбор критериев подобия и масштаба моделирования. Получены уравнения для определения скоростей движения льдин на подходе к основному водосбросному сооружению. Исследования свободной поверхности потока позволили получить для их описания эмпирические зависимости, которые также необходимы при выполнении расчетов по разлому льдин. Выполнено сопоставление данных лабораторных и теоретических исследований, которое показало достаточную их сходимость. Приведены практические рекомендации по использованию полученных результатов.

Ключевые слова: гидротехнические сооружения, низконапорные гидроузлы, пропуск льда, сосредоточенный перепад, свободная поверхность потока, скорость движения льдин, разлом ледяных полей

Studies of the shape of the free flow surface formed on a concentrated drop

Nyailya N. Fomicheva

ORCID: 0000-0003-1278-3199

Olga V. Spirenkova

ORCID: 0000-0002-1401-189X

Alexandra S. Tushina

ORCID: 0000-0001-5128-9383

Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia

Abstract. The methodology for calculating the fracture of ice fields on a concentrated drop is based on a large database of initial data, including the shape of the free flow surface and the speed of movement of ice floes. The relevance of the topic under consideration is beyond doubt. In this connection, it becomes necessary to conduct a series of laboratory studies, the purpose of which is to describe the free flow surface at the drop. The destruction of ice fields and the provision of successful passage through waterworks is possible with the creation of the threshold-weir system, in which their mutual influence on the formation of velocities and free surface takes place. Currently, there are no reliable ways to plot free surface curves above the threshold and weirs.

The paper sets out the tasks of studying the effect of the presence of a concentrated drop on the position of the free surface of the flow and the dynamics of the movement of ice floes during the spring ice drift. The methods of performing the tasks are based on experimental research. Laboratory studies on the movement of ice floes through a concentrated drop were carried out on a specially created installation. At the same time, the criteria of similarity and scale of modeling were selected. Equations for determining the velocities of ice floes on the approach to the main spillway are obtained. Studies of the free flow surface have made it possible to obtain empirical dependences for their description, which are also necessary when performing calculations on ice breakage. A comparison of laboratory and theoretical research data was performed, which showed sufficient convergence. Practical recommendations on the use of the obtained results are given.

Keywords: hydraulic structures, low-pressure waterworks, ice passage, concentrated drop, free flow surface, speed of movement of ice floes, ice fields at once

Введение

Проблема пропуска льда через низконапорные гидроузлы остается актуальной и в настоящее время [1,2,3,4,5,6].

Пропуск льда в эксплуатационный период всегда сопряжен с определенными трудностями [7,8,9]. Как правило, в весенний период водохранилище сработано до минимально допустимых отметок, и ледяные поля при малых глубинах на гребне водослива приводят к его истиранию. При недостаточной ширине пролетных отверстий и плавной кривой спада, на которой не происходит разлома ледяных полей, возможно скопление льдин и образование затора [10]. Лед, поступающий через гребенку в нижний бьеф, воздействует на водосливную грань и оказывает разрушающее действие на гасители водобоя. Назначение схемы пропуска льда в период эксплуатации основывается на проверке и уточнении размеров ширины ледобросного фронта и размеров отдельных пролетов водосливной плотины, а также формировании водной поверхности перед водобросным сооружением.

Пропуск льда в строительный период осуществлялся практически на всех гидроузлах Сибири и Дальнего Востока [11,12,13]. Во время пропуска льда сооружения, как правило, имеют небольшую высоту, а водохранилище – отсутствует, поэтому пропуск льда является более сложным. При этом условия ледохода определяются гидравлическим режимом на участке верхнего бьефа, включая значения поверхностных скоростей течения.

Многие ученые внесли большой вклад в решение вопросов, связанных с пропуском льда в строительный и эксплуатационный периоды.

Проведенные натурные исследования на реках Иртыше и Онеге показали, что при весеннем ледоходе длина льдин составляла от 30 до 50 м [14]. Пропуск льда возможен при ширине пролетных отверстий 20÷24 м. Д.Ф. Панфилов [15, 16], анализируя опыт пропуска льда через некоторые гидроузлы, установил, что для районов Сибири минимальная ширина водобросных отверстий средненапорных гидроузлов должна составлять 11÷16 м. При таких размерах пролетных отверстий для успешного пропуска льда необходимо предусматривать некоторые мероприятия как технологического плана, так и конструктивных решений [17,18]. Возведение вспомогательного порога перед основным сооружением способствует формированию

сосредоточенного перепада свободной поверхности потока, на котором происходит разлом ледяных полей и пропуск отдельных льдин в нижний бьеф.

Ранее получены зависимости, позволяющие определять ширину ледобросного фронта, размеры отламывающихся льдин при движении ледяных полей через сосредоточенный перепад на кривой спада перед водосливом [19]. Однако, они получены без учета наклона льдин на перепаде, формы свободной поверхности и поэтому могут применяться в расчетах для льдин, длиной более 30÷50 м.

Анализируя методы расчета разлома льдин на перепаде и пропуска их через гребенку водосливных плотин, можно отметить следующее: существующие зависимости для расчета изгибающих моментов при движении льдин через перепад и зависимости для определения длины отламывающейся части применимы только для льдин длиной вдоль потока не менее 50 м, скорости и траектории движения льда на участке между сосредоточенным перепадом и ледобросным сооружением могут быть определены только по данным экспериментальных исследований. На небольших реках и каналах льдины имеют меньшие размеры. Этот факт следует учитывать. При разработке новых методов расчета разрушения ледяных полей также необходимо рассматривать динамику потока. Создание искусственного перепада будет способствовать успешному пропуску льда за счет того, что льдина, двигаясь через перепад, испытывает напряжения на изгиб. И при превышении предельного значения происходит разлом льдин на более мелкие. При расчетах напряжений, возникающих в ледяном поле необходимо знать архимедовы силы, которые зависят от формы свободной поверхности потока, размера льдин и угла ее наклона [17].

Представляется необходимым исследовать кривые свободной поверхности, образующейся на сосредоточенном перепаде, так как этот вопрос разработан слабо [19] и, как правило, для каждого конкретного случая выполняются специальные лабораторные исследования.

Таким образом, основные цели лабораторных исследований состоят в следующем: определение поля поверхностных скоростей перед водосливом; описание свободной поверхности потока жидкости на перепаде. Состав лабораторных исследований включал: выбор критериев подобия и масштаба моделирования; подбор материала для изготовления образцов искусственного льда; изготовление установки для измерения скоростей; изучение характера движения льда при различных значениях перепада на пороге. Такой комплекс лабораторных исследований дает возможность получить основные параметры, определяющие движение льда на исследуемом участке между сосредоточенным перепадом и основным водосливом.

Методы

Для выполнения поставленных задач были проведены экспериментальные лабораторные исследования с использованием специально изготовленной установки, включающей модель водослива, перед которым для создания сосредоточенного перепада установлен вспомогательный порог (рис. 1).

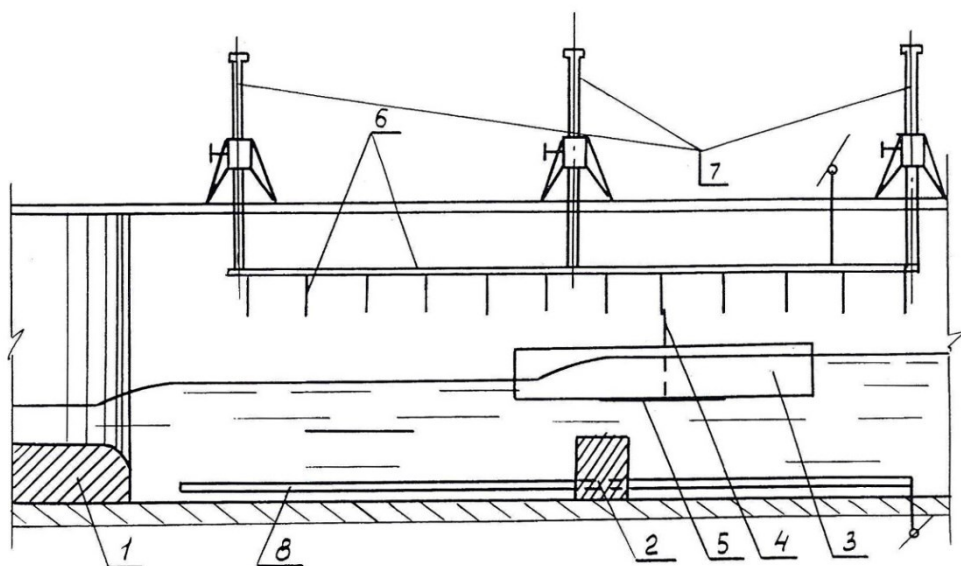


Рис. 1. Конструкция установки для измерения скоростей движения льда

1 – основной водослив; 2 – вспомогательный порог; 3 – льдина; 4 – подвижный контакт;
5 – фольга; 6 – неподвижный контакт; 7 – подъемные устройства;
8 – выравнивающий контакт

Моделирование выполнялось с соблюдением следующих принципов [19,21]:

- геометрическое подобие

$$l_m/l_n = \mu_l = const \quad (1)$$

- динамическое подобие (равенство чисел Фруда)

$$\frac{v_m^2}{gl_m} = \frac{v_n^2}{gl_n} = const \quad (2)$$

- Равенство отношений плотности льда и воды

$$\frac{\rho_{лн}}{\rho_{вн}} = \frac{\rho_{лм}}{\rho_{вм}} = const \quad (3)$$

где l – геометрический размер; v – скорость; μ_l – линейный масштаб; g – ускорение силы тяжести.

Модель водосбросных сооружений выполнялась в масштабе 1:35.

Основываясь на данных по пропуску льда, максимальное расстояние между водосливом и порогом должно быть не более 40 м. Наибольшая глубина в верхнем бьефе, в пересчете на натурные условия составляет 10 м. Минимальное расстояние ограничивается влиянием водослива и составляет величину равную $3H_b$, где H_b – напор на водосливе. Гидравлический перепад составляет от 0, 2 до 3,0 м. Так, например, при возведении Новосибирского гидроузла величина перепада на пороге – 0,2 м; Братского – 0,5 м; Бухтарминского – 2, 75 м.

Результаты

Выполненные экспериментальные исследования показали характер изменения скоростей потока между водосливом и порогом (рис. 2,3,4). Анализ результатов

позволил установить зависимость величины скорости потока от расстояния до порога и величины перепада.

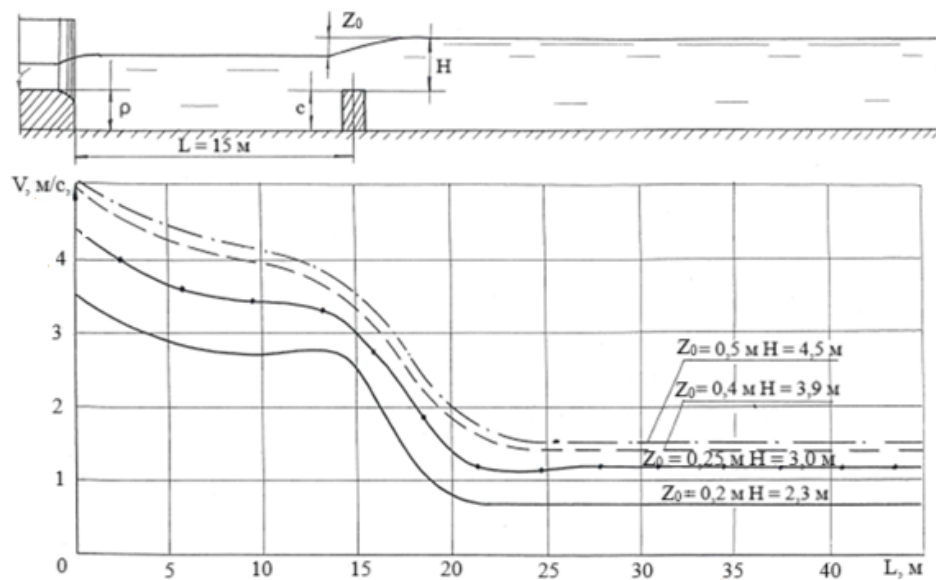


Рис. 2. Изменение поверхностных скоростей потока при $L = 15,0$ м

где: Z_0 – величина перепада; H – напор на вспомогательном пороге; c – высота вспомогательного порога; ρ – высота основного водослива; L – расстояние от основного водослива до вспомогательного порога.

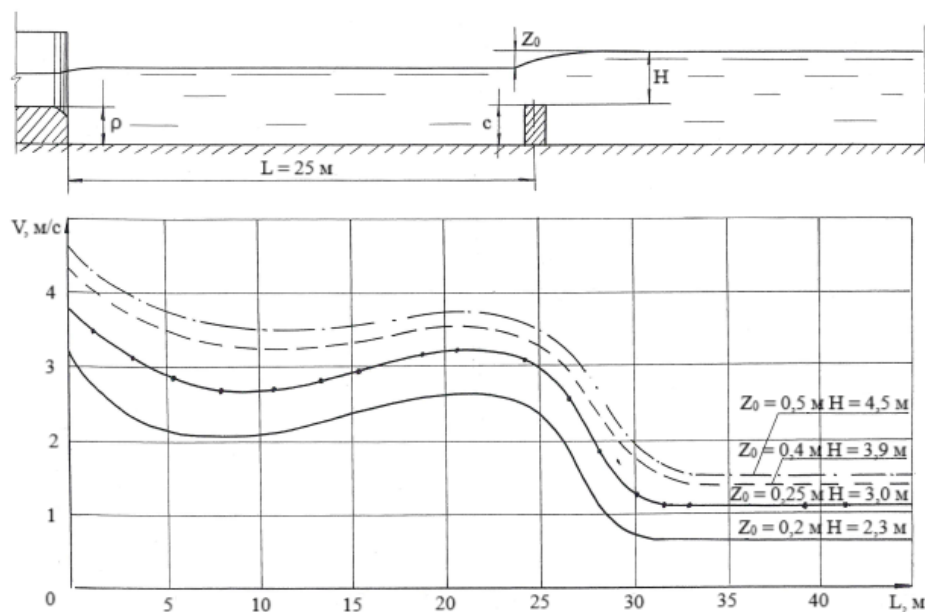


Рис. 3. Поверхностная скорость потока при $L = 25,0$ м

где: Z_0 – величина перепада; H – напор на вспомогательном пороге; c – высота вспомогательного порога; ρ – высота основного водослива; L – расстояние от основного водослива до вспомогательного порога.

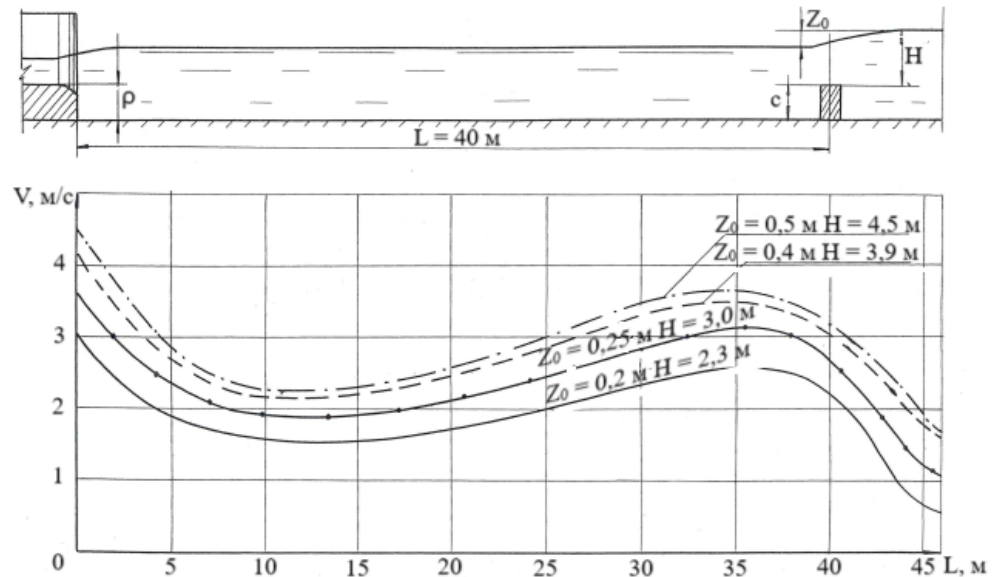


Рис. 4. Поверхностная скорость потока при $L = 40$ м
 где: Z_0 – величина перепада; H – напор на вспомогательном пороге; c – высота вспомогательного порога; p – высота основного водослива; L – расстояние от основного водослива до вспомогательного порога.

Согласно полученным значениям скоростей потока для описания $v = f(t)$ можно использовать функцию вида:

$$v = v_0 + A(1 - \cos \omega t) \quad (4)$$

где v_0 – скорость движения льда в верхнем бьефе; $A = v_{\max} - v_0$; $v_{\max}$ – максимальное значение скорости льдины при движении через перепад; $\omega = \pi / T$; T – время, в течение которого льдина приобретает скорость от v_0 до $v_{\max}$; t – время отсчета.

Величина A , в основном, зависит от перепада z_0 и длины льдины l . Это позволило описать ее полиномом второй степени

$$A = m_1 z_0^2 + m_2 z_0 + C \quad (5)$$

Для отыскания коэффициентов m_1 , m_2 и C использовался метод наименьших квадратов, в результате чего получена система двух уравнений:

$$\left. \begin{aligned} m_1 \sum_{i=1}^n z_i^4 + m_2 \sum_{i=1}^n z_i^3 - \sum_{i=1}^n (C - A_i) z_i^2 &= 0 \\ m_1 \sum_{i=1}^n z_i^3 + m_2 \sum_{i=1}^n z_i^2 - \sum_{i=1}^n (C - A_i) z_i &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

совместное решение которых дает возможность определить коэффициенты m_1 , m_2 и C . Значения этих коэффициентов, нанесенные на график (рис. 5), образовали линии, хорошо аппроксимирующиеся уравнениями типа

$$y = ax + b. \quad (7)$$

Конкретно эти коэффициенты могут быть описаны зависимостями

$$\left. \begin{aligned} m_1 &= 0,014l - 2,8 \\ m_2 &= -0,016l + 4,3 \\ C &= -0,0032l + 0,61 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Величина T также зависит от расстояния и перепада:

$$T = f(l, z_0). \quad (9)$$

Иначе можно представить в виде:

$$T = m_3 z_0 + C_1. \quad (10)$$

Коэффициенты m_3 и C_1 определяются по графикам (рис. 6) $C_1 = 0,48L + 0,5$; $m_3 = -0,0032L^2 + 0,245L$

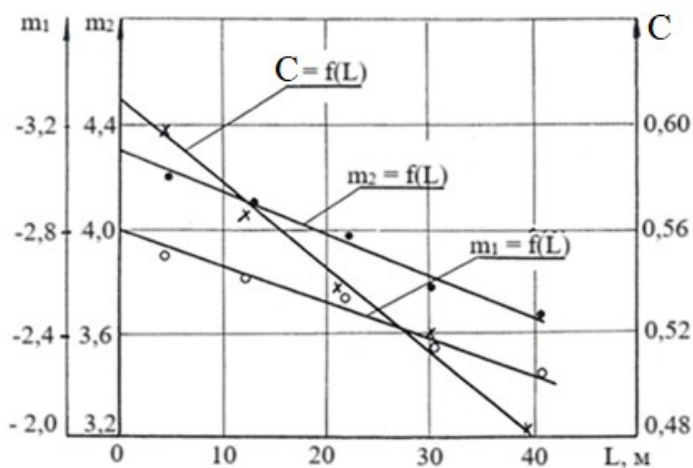


Рис.5. Графики для определения постоянных коэффициентов

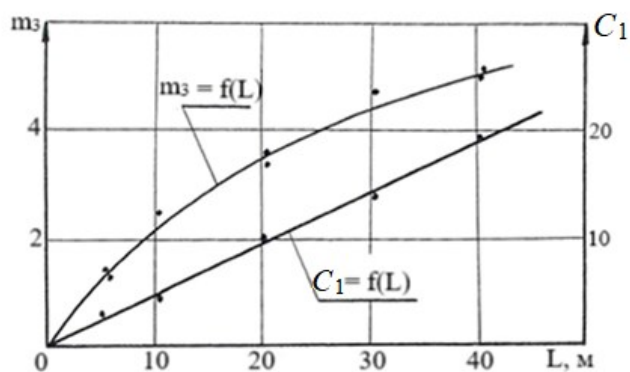


Рис.6. Графики для определения коэффициентов C_1 и m_3

Эмпирические зависимости, используемые для описания кривых свободной поверхности потока, имеют вид [19]:

$$\xi = z_0 (1 - e^{-k\chi}); \quad (11)$$

$$\xi = a\chi^2 + b\chi + c, \quad (12)$$

где ξ и χ - текущие координаты свободной поверхности (рис. 7); z_0 - величина перепада; k , a , b и c' - постоянные коэффициенты, определяемые из опыта.

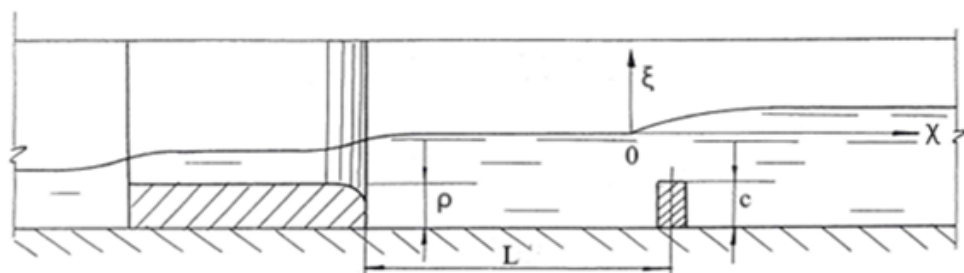


Рис. 7. Схема для построения кривых свободной поверхности

Определение постоянных коэффициентов k , a и b базировалось на экспериментальных данных. Лабораторные исследования позволили установить, какое из двух уравнений (11) или (12) более точно описывает кривую свободной поверхности. Обработка опытных данных при этом проводилась по методу наименьших квадратов. Для определения коэффициента k выражение (11) было приведено к виду: $1 - \frac{\xi}{z_0} = e^{-k\chi}$, логарифм, от которого записывается как

$$\ln \left(1 - \frac{\xi}{z_0} \right) = -k\chi.$$

Функция ошибки последнего уравнения:

$$f(k) = \min \sum_{i=1}^n \left[-k\chi_i - \ln \left(1 - \frac{\xi_i}{z_0} \right) \right]^2. \quad (13)$$

Дифференцируя функцию $f(k)$ по k и приравняв правую часть к нулю, найдем

$$k = \frac{-\sum_{i=1}^n \chi_i \ln \left(1 - \frac{\xi_i}{z_0} \right)}{\sum_{i=1}^n \chi_i}. \quad (14)$$

где n - количество точек.

Для определения коэффициентов a и b в уравнении (12) проводим аналогичные преобразования:

$$f(a, b) = \min \sum_{i=1}^n \left(a\chi_i^2 + b\chi_i - \xi_i \right)^2. \quad (15)$$

Дифференцируя функцию $f(a, b)$ по a и b и приравняв ее производные к нулю, получим систему двух уравнений:

$$\left. \begin{aligned} a \sum_{i=1}^n \chi_i^4 + b \sum_{i=1}^n \chi_i^3 - \sum_{i=1}^n \xi_i \chi_i^2 &= 0 \\ a \sum_{i=1}^n \chi_i^3 + b \sum_{i=1}^n \chi_i^2 - \sum_{i=1}^n \xi_i \chi_i &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

совместное решение которых дает возможность определить коэффициенты a и b .

Обсуждение

Выполненный комплекс лабораторных экспериментов и обработка полученных данных позволили получить значения опытных коэффициентов и построить кривые свободной поверхности потока (рис. 8).

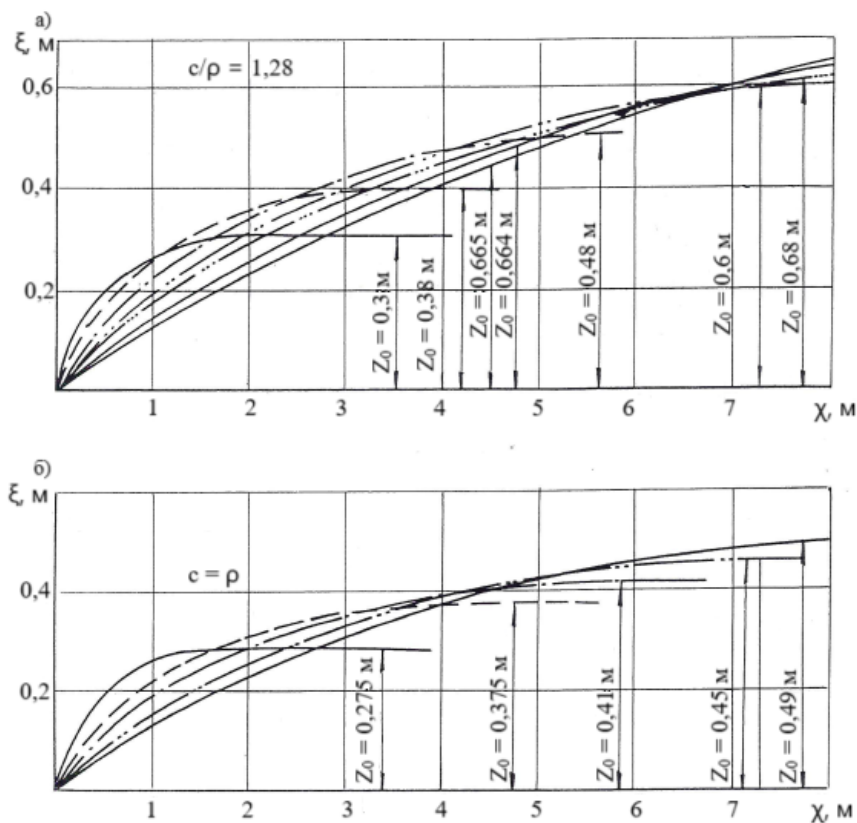


Рис. 8. Формы свободной поверхности потока на сосредоточенном перепаде, построенные по зависимости (12)

Построение свободной поверхности возможно как по уравнению (11), так и по уравнению (12). Чтобы остановиться на одном из них, выполнены статистические расчеты и для каждой кривой определялась среднеквадратическая ошибка:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n-1}}, \quad (17)$$

где $\varepsilon_i = \xi_i - \xi$; ξ - ордината, вычисленная по уравнению (11) или (12); ξ_i - наблюдаемые значения.

Расчеты показали, что средняя квадратическая ошибка для уравнения (11) находилась в пределах от 9,2% до 16,3%, а для уравнения (12) – от 2,1% до 4,9%, поэтому в дальнейшем для описания кривой свободной поверхности использовалось уравнение (12). Данные лабораторных исследований показали, что коэффициенты a и b изменяются в зависимости от величины перепада z_0 (рис. 8).

Представляя опытные данные в виде квадратичной параболы и используя метод наименьших квадратов, найдены коэффициенты, входящие в уравнение (12):

$$\left. \begin{aligned} a &= -0,28z_0^2 + 0,33z_0 - 0,105 \\ b &= 0,75z_0^2 - 1,56z_0 + 0,8 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Среднеквадратическая ошибка для a составила 2,7%, для b – 3,3%.

Сопоставляя имеющиеся натурные данные скоростей движения льдин перед гребенкой при наличии сосредоточенного перепада [22] с вычисленными по полученным зависимостям, видим вполне удовлетворительное соответствие. Так, например, для Новосибирского гидроузла скорость льда измеренная составила 3,0÷3,5 м/с, а вычисленная 2,4÷3,4 м/с; для Красноярского гидроузла соответственно: 3,5÷4,0 м/с и 3,9÷4,6 м/с

Заключение

В заключении отметим, что специально созданная установка позволила изучить движение льдин на сосредоточенном перепаде. В результате выполненных экспериментов получены данные об изменении поверхностных скоростей между вспомогательным порогом и основным водосливом. Также опытным путем определены коэффициенты, входящие в уравнения для описания формы свободной поверхности потока. Таким образом, уравнения могут быть использованы в расчетах по разлому ледяных полей при движении через водобросные сооружения.

Список литературы

1. Козлов Д. В., Бузин В. А., Фролова Н. Л. и др. Опасные ледовые явления на реках и водохранилищах России: Монография / Д.В. Козлов, В.А. Бузин, Н.Л. Фролова, С.А. Агафонова, В.Л. Бабурин, Л.С. Банщикова, Горошкова Н.И., А.С. Завадский, И.Н. Крыленко, К.Л. Савельев, К.Д. Козлов, Л.Ф. Бузина. Под общей ред. проф., д.т.н. Козлов Д.В. – М.: Изд-во РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2015. – 348 с.
2. Атавин А.А., Зиновьев А.Т., Кудишин А.В. Планирование пусков в нижний бьеф Новосибирского гидроузла в условиях экстремальных гидрологических ситуаций. – Барнаул, Ползуновский вестник, №4, 2005, с. 95-100.
3. Фомичева Н. Н., Кофеева В. Н. Беззаторный пропуск льда через гидроузлы в эксплуатационный период. Журнал: Научные проблемы водного транспорта / Водные пути, порты и гидротехнические сооружения № 72(3) (2022): DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi72.296>
4. Бузин В. А., Зиновьев А. Т. Ледовые процессы и явления на реках и водохранилищах. Методы математического моделирования и опыт их реализации для практических целей (обзор современного состояния проблемы): Монография / В.А. Бузин, А.Т. Зиновьев. Барнаул: Изд-во ООО «Пять плюс». – 2009. – 168 с.
5. Савичев О. Г. Расчет заторных уровней речных вод на юге Западной Сибири / О.Г. Савичев. - Известия Томского политехнического университета, Т. 320, №1: Науки о Земле, 2012, с. 152-155.
6. Болгов Н. В., Борщ С. В., Хазиахметов Р. М. Опасные гидрологические явления: методы анализа, расчета и прогнозирования, смягчение негативных последствий / Н.В. Болгов, С.В. Борщ, Р.М. Хазиахметов // Тезисы докладов. VII Всероссийский гидрологический съезд (Санкт–Петербург). – СПб., 2013 – С.6–12.
7. Панфилов Д. Ф. Разрушение ледяных полей под влиянием местных изменений уровня воды // Гидротехническое строительство. 1965. № 12. С. 21–25.
8. Коржавин К. Н. Пропуск льда при строительстве и эксплуатации гидроузлов. М.: Энергия. 1973. 160 с.
9. N. Fomicheva, D. Panov, A. Kalashnikov. Studies of the movement of ice through low-pressure waterworks. Journal of Physics: Conference Series 2131 (2021) 032072. DOI:10.1088/1742-6596/2131/3/032072
10. Устинов Г. Н. Ледовые затруднения на гидроэлектростанциях Карелии. – Труды координационных совещаний по гидротехнике, вып. 3. – Л.: Энергия, 1976, с. 97-100.

11. Сокольников Н. М. Пропуск льда в строительный период через частично возведенные сооружения на реках Сибири. – Труды координационных совещаний по гидротехнике, вып. 10. – М.: Энергия, 1964, с. 6-10.
12. Плотников В. М., Бруссе А. Г. Пропуск паводковых расходов р. Хантайки во время строительства через гребень каменнонабросной плотины Усть-Хатайской ГЭС. – Гидротехническое строительство, 1971, «11, с.5-7.
13. Кореньков В. А. Пропуск льда при строительстве Саяно-Шушенской ГЭС // Гидротехническое строительство. – 1979, №8. – С. 25–28.
14. Фомичев Б. С., Кротов С. А. Натурные исследования прочности льда Новосибирского водохранилища и р. Онега / Б. С. Фомичев, С. А. Кротов. – Изв. Вузов, Строительство и архитектура, 1984, №9, с. 83-87.
15. Панфилов Д. Ф. Определение минимальной ширины пролетов плотины из условий пропуска льда. - Гидротехническое строительство, 1971, № 8.
16. Панфилов Д. Ф. Расчет гребенки плотины на пропуск льда // Гидротехническое строительство. 1958, №7. С.32–36.
17. Fomicheva N. N. The constructions, which provide passing of ice through low-pressure waterworks in spring period / Science. Education. Practice: materials of the International University Science Forum (Canada, Toronto). May 27. 2020. Infinity Publishing. pp. 225-231. Doi: 10.34660/INF.2020.23.42.001.
18. Fomicheva N. N., Heckert E. V., Modina M. A., Beryozha I. G. Calculation of the fracture of ice fields at a concentrated drop. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 867 (2021) 012005. DOI 10.1088/1755-1315/867/1/012005
19. Чугаев Р. Р. Гидравлика. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.
20. Готлиб Я. Л. Пропуск льда при строительстве и эксплуатации гидроузлов / Я. Л. Готлиб, В. А. Кореньков, К. Н. Коржавин и др. – М.: Энергия, 1973. – 160 с.
21. Циликин В. Ф. Моделирование пропуска льда при проведении лабораторных гидравлических исследований // Исследования и расчёты заторов льда, вопросы ледотермики и гидродинамики. Л.: Гидрометеиздат. Вып.192. 1972. С.30-36.
22. Готлиб Я. Л. Пропуск льда через гидротехнические сооружения / Готлиб Я. Л., К.Н. Коржавин, В.А. Кореньков, И.Н. Соколов. – М.: Энергоатомиздат, 1990, 184 с.

References

1. Kozlov D. V., Buzin V. A., Frolova H. L. and others. Dangerous ice phenomena on rivers and reservoirs in Russia: Monograph / D.V. Kozlov, V.A. Buzin, H.L. Frolova, S.A. Agafonova, B.L. Baburin, L.S. Banskchikova, Goroshkova N.I., A.S. Zavadsky, I.N. Krylenko, K.L. Saveliev, K.D. Kozlov, L.F. Buzina. Under the general editorship of Professor, Doctor of Technical Sciences Kozlov D.V., Moscow: Publishing House of the Russian State Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, 2015. 348 p.
2. Atavin A. A., Zinoviev A. T., Kudishin A. V. Planning of releases into the lower reaches of the Novosibirsk hydroelectric complex in conditions of extreme hydrological situations. Barnaul, Polzunovsky Bulletin, No. 4, 2005, pp. 95-100.
3. Fomicheva N. N., Kofeeva V. N. Lockless passage of ice through waterworks during the operational period. Journal: Scientific problems of water transport / Waterways, ports and Hydraulic structures No. 72(3) (2022): DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi72.296>
4. Buzin V. A., Zinoviev A. T. Ice processes and phenomena on rivers and reservoirs. Mathematical modeling methods and the experience of their implementation for practical purposes (review of the current state of the problem): Monograph / V.A. Buzin, A.T. Zinoviev. Barnaul: Publishing house of LLC "Five plus". - 2009. – 168 p.
5. Savichev O. G. Calculation of congestion levels of river waters in the south of Western Siberia / O.G. Savichev. - Proceedings of Tomsk Polytechnic University, vol. 320, No. 1: Earth Sciences, 2012, pp. 152-155.
6. Bolgov N. V., Borsch S. V., Khaziakhmetov R. M. Dangerous hydrological phenomena: methods of analysis, calculation and forecasting, mitigation of negative consequences / N.V. Bolgov, S.V. Borsch, R.M. Khaziakhmetov // Abstracts of reports. VII All-Russian Hydrological Congress (Saint Petersburg). Saint Petersburg, 2013– pp.6-12.
7. Panfilov D. F. The destruction of ice fields under the influence of local changes in water level // Hydraulic engineering. 1965. No. 12. pp. 21-25.

8. Korzhavin K. N. The passage of ice during the construction and operation of waterworks. Moscow: Energiya. 1973. 160 p.
9. Fomicheva N., Panov D., Kalashnikov A. Studies of the movement of ice through low-pressure waterworks. Journal of Physics: Conference Series 2131 (2021) 032072. DOI:10.1088/1742-6596/2131/3/032072
10. Ustinov G. N. Ice difficulties at hydroelectric power plants in Karelia. – Proceedings of coordination meetings on hydraulic engineering, vol. 3. – L.: Energiya, 1976, pp. 97-100.
11. Sokolnikov N. M. Ice passage during the construction period through partially erected structures on the rivers of Siberia. – Proceedings of the Coordination Meetings on Hydrotechnics, vol. 10. Moscow: Energiya Publ., 1964, pp. 6-10.
12. Plotnikov V. M., Brousse A. G. Passage of flood expenses of the Khantaika River during construction through the crest of the Ust-Khatai hydroelectric dam. – Hydraulic engineering construction, 1971, "11, pp.5-7.
13. Korenkov V. A. Ice passage during the construction of the Sayano-Shushenskaya HPP // Hydraulic engineering construction. 1979, No. 8. pp. 25-28.
14. Fomichev B. S., Krotov S. A. Field studies of the strength of the Novosibirsky reservoir and the Onega River / B. S. Fomichev, S. A. Krotov. – Izv. Vuzov, Construction and Architecture, 1984, No. 9, pp. 83-87.
15. Panfilov D. F. Determination of the minimum width of the dam spans from the conditions of ice passage. - Hydraulic Engineering Construction, 1971, No. 8.
16. Panfilov D. F. Calculation of the dam comb for ice passage // Hydraulic engineering. 1958, No. 7. pp.32-36.
17. Fomicheva N. N. The constructions, which provide passing of ice through low-pressure waterworks in spring period / Science. Education. Practice: materials of the International University Science Forum (Canada, Toronto). May 27. 2020. Infinity Publishing. pp. 225-231. Doi: 10.34660/INF.2020.23.42.001.
18. Fomicheva N. N., Heckert E. V., Modina M. A., Beryozha I. G. Calculation of the fracture of ice fields at a concentrated drop. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 867 (2021) 012005. DOI 10.1088/1755-1315/867/1/012005
19. Chugaev R. R. Hydraulics. – L.: Energoizdat, 1982. – 672 p.
20. Gottlieb Ya. L. Skipping ice during the construction and operation of waterworks / Ya. L. Gottlieb, V. A. Korenkov, K. N. Korzhavin et al. – M.: Energy, 1973. – 160 p.
21. Tsilikin V. F. Modeling of ice passage during laboratory hydraulic studies // Research and calculations of ice jams, issues of icebreaking and hydrodynamics. L.: Hydrometeoizdat. Issue 192. 1972. pp.30-36.
22. Gottlieb Ya. L. Passing ice through hydraulic structures / Gottlieb Ya. L., K.N. Korzhavin, V.A. Korenkov, I.N. Sokolov. Moscow: Energoatomizdat, 1990, 184 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Фомичева Няиля Николаевна, доцент кафедры Строительного производства, водных путей и гидротехнических сооружений, к.т.н., доцент, Сибирский Государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «СГУВТ»), 630099, Новосибирская область, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: ginelli1949@mail.ru

Спиренкова Ольга Владимировна, доцент кафедры Строительного производства, водных путей и гидротехнических сооружений, к.т.н., доцент, Сибирский Государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «СГУВТ»), 630099, Новосибирская область, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: olga_spirenkova@mail.ru

Тушина Александра Сергеевна, доцент

Nyailya N. Fomicheva, Associate Professor of the Department of Construction Production, Waterways and Hydraulic Structures, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Siberian State University of Water Transport, 630099, Novosibirsk region, Novosibirsk, Shchetinkina str., 33, e-mail: ginelli1949@mail.ru.

Olga V. Spirenkova, Associate Professor of the Department of Construction Production, Waterways and Hydraulic Structures, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Siberian State University of Water Transport, 630099, Novo-Siberian region, Novosibirsk, Shchetinkina str., 33, e-mail: olga_spirenkova@mail.ru

Alexandra S. Tushina, Associate Professor of

кафедры Строительного производства,
водных путей и гидротехнических
сооружений, к.г.н., доцент, Сибирский
Государственный университет водного
транспорта (ФГБОУ ВО «СГУВТ»), 630099,
Новосибирская область, г. Новосибирск, ул.
Щетинкина, 33,
e-mail: tytylechka@mail.ru

the Department of Construction Production,
Waterways and Hydraulic Engineering,
Candidate of Geographical Sciences, Associate
Professor, Siberian State University of Water
Transport, 630099, Novosibirsk region,
Novosibirsk, Shchetinkina str., 33,
e-mail: tytylechka@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16.06.2025; опубликована онлайн 20.09.2025.
Received 16.06.2025; published online 20.09.2025.

РАБОТЫ ВОЛЖСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДЛЯ СКОРОСТНОГО СУДОХОДСТВА



VSUWT.RU



РЕЧНАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА

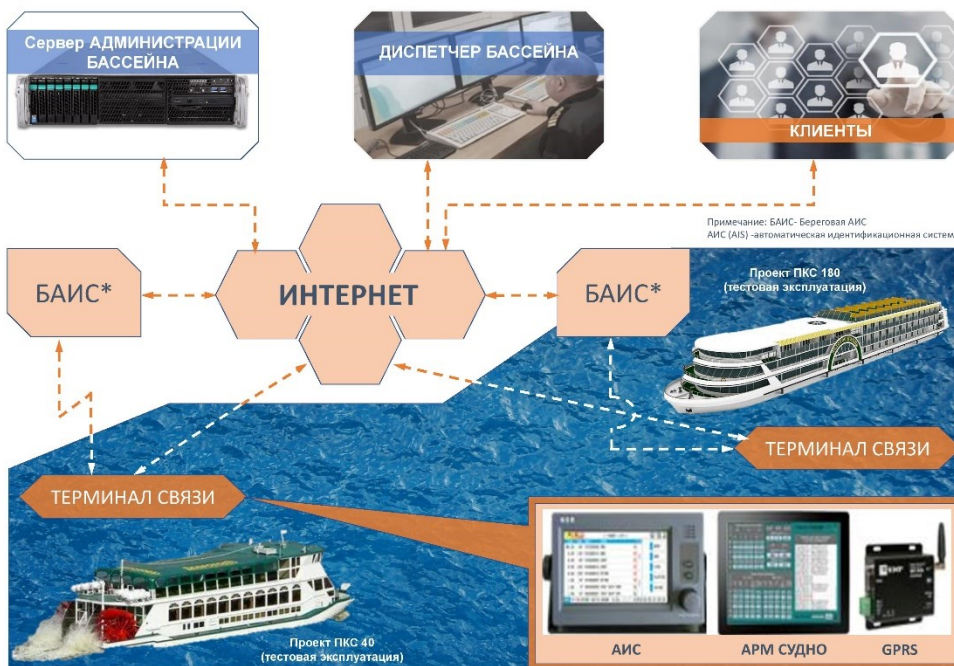


Для Судоходных компаний и Администраций
бассейнов внутренних водных путей



Функциональные возможности:

- гарантированная доставка и архивирование распоряжений и докладов с подтверждением факта приема/передачи информации;
- снижение нагрузки на вахтенного начальника по ведению радиообмена с диспетчерскими службами и освобождение диспетчеров от ручного ввода информации по дислокации флота, состоянию навигационной обстановки и пр. в отчетные формы;
- автоматическая генерация базы данных по дислокации флота и транспортным операциям для проведения анализа работы флота и разработки мер по повышению эффективности его работы;
- прогноз времени прибытия судов для согласованной работы портовой, рейдовой и обслуживающей инфраструктуры;
- анализ данных архива распоряжений и докладов для выявления обоснованности действий диспетчерских служб и экипажей судов при транспортных происшествиях и в нештатных ситуациях и пр.



Инженерные изыскания на водных объектах



“Качественные инженерные изыскания – это крепкий фундамент любого проекта

Специалисты университета проводят изыскания для: осуществления проектирования, строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений и транспортной инфраструктуры, добычи нерудных строительных материалов в руслах рек, проектирования новых судовых ходов, улучшения судоходных условий на внутренних и морских водных путях

Инженерно-геодезические и гидрографические изыскания



Основные виды работ:

- Топографическая съемка;
- Съемка рельефа дна;
- Промеры глубин;
- Гидрографическое траление;
- Создание планов и карт водных объектов.

Основное оборудование:

- Спутниковые ГНСС-приемники (EFT);
- Одночастотный эхолот (EFT);
- Электронный тахеометр (Nikon, South);
- Оптические нивелиры (South).

Инженерно-гидрометеорологические изыскания



Основные виды работ:

- Измерение уровней воды;
- Измерение скоростей течения воды;
- Расчеты расходов и стоков рек;
- Исследования русловых процессов;
- Статистическая обработка гидрологических и метеорологических данных.

Основное оборудование:

- Спутниковые ГНСС-приемники (EFT);
- Гидрометрические вертушки (Поток);
- Электронный тахеометр (Nikon, South);
- Батометры;
- Программный комплекс «Гидрорасчеты»

Инженерно-экологические изыскания



Основные виды работ:

- Исследование качества воды по всем основным химическим показателям;
- Расчет прогнозов разливов нефти и загрязняющих веществ в водоемах;
- Исследование биоценоза водоема.

Основное оборудование:

- Спутниковые ГНСС-приемники (EFT);
- Одночастотный эхолот;
- Лаборатория химии и экологии;
- Пробоотборники.



- Членство в саморегулируемой организации Ассоциация «Национальное объединение изыскателей «Альянс развития» (СРО-И-046-23072019).
- Имеет Разрешение на инженерные изыскания в отношении особо опасных, технически сложных и уникальных объектов капитального строительства.
- Партнерство с EFT GROUP, одним из лидеров по производству и продвижению современного отечественного геодезического и гидрографического оборудования и программного обеспечения.
- Все инженерное оборудование сертифицировано и проходит регулярное метрологическое обеспечение.

Недавно выполнены изыскания на следующих инженерных и научных проектах:

- Расчистка русла реки Теша в Арзамасском районе Нижегородской области;
- Оценка возможности разработки действующих карьеров и выделения участков для разведки и последующей разработки карьеров по добыче нерудных строительных материалов с учетом обеспечения устойчивости судового хода и недопустимости посадки уровня воды в существующих условиях на реке Верхняя Белая;
- Установка плавучей заправочной станции в пос. Займище г. Казань Республика Татарстан;
- и ряде других.



В рамках проекта Русского географического общества «Плавучий университет Волжского бассейна»

Экологический мониторинг Волжско-Камского бассейна: Более 10 лет непрерывных исследований.

www.vsuwt.ru



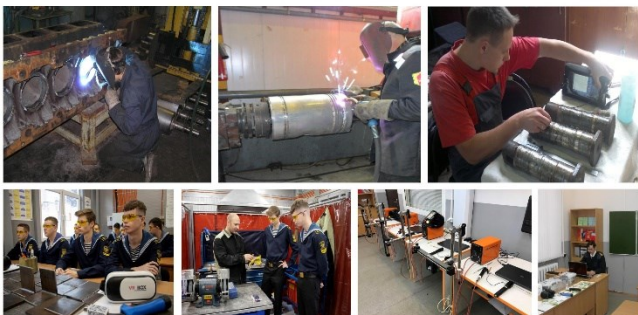
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ТРЕНАЖЕРНЫЙ ЦЕНТР «МЕХАНИК»



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» всецело 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, И.Новгород, ул. Б. Печерская 93



Инженерно-конструкторское бюро
инженера-конструктора Е.В. Фальмонова

Работы КОНСТРУКТОРСКОГО БЮРО

В рамках Направлений:
ИНФРАСТРУКТУРА ВОДНОГО ТРАНСПОРТА и
ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАЛОМЕРНОГО ФЛОТА



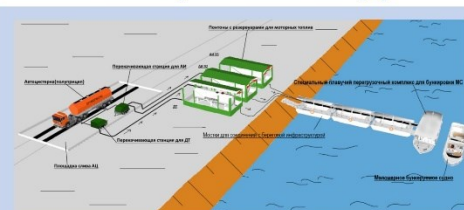
ПРЕДЛАГАЕМЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ БУНКЕРОВКИ МАЛОМЕРНЫХ СУДОВ ЖИДКИМ МОТОРНЫМ ТОПЛИВОМ

Малая топливораздаточная платформа

Особенность: резерв
топлива находится на берегу.
Размеры платформы в плане
10×5 метров



Большая топливораздаточная платформа



Данный вид станции одного типа с малой платформой, отличие
заключается в габаритных размерах и типе устанавливаемой
раздаточной колонки.

Бункеровочная станция

Стоечное судно. Подача топлива может осуществляться
как с берега, так и наливом с танкера. В конструкции имеет танки
для разных видов топлива: бензины АИ-92 и АИ-95, а также
дизельное топливо.

На станции устанавливаются топливораздаточные колонки
или насосная установка с автоматизированной дозой выдачи
топлива. Возможно производить бункеровку на рейде.



Перечень регулирующих организаций для проектов по бункеровке судов на
Внутренних водных путях (на Водных объектах вне ВВП процедура другая)

1. Российское классификационное общество; 2. Администрация внутренних водных
путей; 3. Администрация района водных путей и судоходства; 4. Бассейновое водное
управление; 5. Федеральное агентство водных ресурсов; 6. Территориальное
управление Росрыболовства; 7. Роспотребнадзор; 8. Комитет по имуществу и
земельным отношениям; 9. Государственный морской и речной надзор

РАЗРАБОТКА ПРОЕКТОВ ХАУСБОТОВ

Проектирование для судоверфи:



Проектирование под самострой (частные заказчики)



Кемпер-боты



Конструкторское бюро разработало проектную
документацию для плавучих домов (хаусботов)
различных российских производителей, от
эскизных проектов и 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»



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, форматируется 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 форматируются 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** - предоставление 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 punycode-конвертором (например, <https://hb.by/punycode-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--p1ai/>.

Для перевода русского текста на латиницу используются правила **British Standard 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**

№84(3), 2025

Формат бумаги 70x180 1/16. Бумага офсетная.
Ризография. Усл. печ. л. 17,86. Уч.-изд. л. 25,00.
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.