

Russian Journal of Water Transport

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

Научные проблемы водного транспорта № 75 (2) 2023

Научные проблемы  
**ВОДНОГО  
ТРАНСПОРТА**



№75 (2) 2023



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

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

# Научные проблемы водного транспорта

## №75 (2) 2023

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

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:** 603091, 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](mailto: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;

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;

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

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

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

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

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

Ярисов Владимир Владимирович, доктор технических наук, доцент, Балтийское высшее военно-морское училище им. Ф.Ф. Ушакова, Калининград, Россия



# Russian Journal of Water Transport №75 (2) 2023

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:** 603091, 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](mailto: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 unuversity 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 unuversity of water transport, Nizhny Novgorod, Russia;

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

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

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

Nikolay N. Kazakov, Cand. Sci. (Tech.), deputy dean of 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 unuversity of water transport, Nizhny Novgorod, Russia;

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

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

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

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

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

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

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.), 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;

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.

Vladimir V. Yarisov, Dr. Sci. (Tech.), assistant professor, Baltic Naval Institute, Kaliningrad, Russia



## **Конструкторское бюро ВГУВТ**

**Института инноваций в судостроении и судоремонте организовано при ФГБОУ ВО "Волжский государственный университет водного транспорта" в Нижнем Новгороде в 2014 году.**

### **Оказываемые услуги в сфере гражданского, грузового, технического, пассажирского флота и береговой инфраструктуры:**

- ▶ Разработка документации эскизного, технического и рабочего проектов судов и объектов морской и речной техники;
- ▶ Согласование документации с классификационными обществами: РРР, РМСР и др., в том числе с ГИМС;
- ▶ Проектирование порт-пристаней, береговой инфраструктуры, включая яхт-клубы;
- ▶ Расчёты прочности, гидро- и аэродинамики с использованием лицензионного программного обеспечения;
- ▶ Консалтинговые услуги, в том числе проведение испытаний судов и материалов;
- ▶ Дизайн объектов морской и речной техники, 3D-моделирование, создание анимаций;
- ▶ Организация постройки судов; Конструкторское сопровождение производства.



Руководитель КБ ВГУВТ  
Шабала Алексей Геннадьевич  
kb-vsawt.ru  
+7(987)110-36-67  
8(831)419-78-41  
skb@vsawt.com



# СОДЕРЖАНИЕ

## **Судостроение, судоремонт и экологическая безопасность судна**

**А.Н. Бердник**

Переоборудование судна военного назначения в гражданское  
судно-рефрижератор ..... 15

**А.Л. Гусев, Е.А. Першин**

Исследование гидродинамических характеристик элементов системы отведения  
многомерной сейсмической косы ..... 27

**С.В. Давыдова, К.П. Мочалов**

Методика автоматизированного формирования судовой поверхности буксирного  
судна ..... 36

**С.А. Казьмин, А.В. Лобанов, С.В. Вербицкий**

Обзор классификации полупогружных плавучих буровых установок  
по поколениям ..... 51

**М.В. Китаев, И.А. Новосельцев**

Применение методов многокритериальной оптимизации для решения задачи  
проектирования судна ..... 66

**А.Э. Корепанов, Е.П. Роннов**

Расчет нагрузки масс пассажирского речного тримарана в задачах исследовательского  
проектирования ..... 76

**В.А. Крамарь, А.В. Родькина, О.А. Иванова, В.Р. Душко**

Исследования микроскопии поверхностного слоя стали в районе переменной  
ватерлинии судов и океанотехнических объектов ..... 84

**А.А. Хлыбов, Д.А. Рябов, А.А. Соловьев, М.С. Аносов, Ю.И. Матвеев**

Влияние пластической деформации на структуру и свойства стали 20ХГСА,  
полученной методом аддитивного электродугового выращивания ..... 95

**Е.Ю. Чебан, А.Н. Лучков**

Численное моделирование испытаний составного крыла экраноплана в  
аэродинамической трубе ..... 108

## **Судовое энергетическое оборудование**

**В.Л. Конюков**

Сравнение показателей напряженности главного двигателя буксира-толкача при  
работе в режимах буксировки и толкания ..... 118

**Ю.И. Матвеев, Н.А. Лаптев, В.В. Колыванов, М.Ю. Храмов**

Природный газ как альтернатива жидким углеводородам на судах с дизельной  
установкой ..... 127

**И.Л. Титов**

Исследование нетрадиционного возбуждателя зубчатого статора с помощью  
программного обеспечения методом конечных элементов ..... 136

## ***Экономика, логистика и менеджмент на транспорте***

***М.В. Ботнарюк, Е.Ю. Грасс***

Методические основы оценки качества транспортно-логистического обслуживания клиентов оператора морского терминала ..... 145

***А.И. Гаврилов, И.И. Стрельцов, У Сяньюй***

Модернизация транспортной системы в азиатско-российском секторе как основа безопасности глобальной экономической реструктуризации ..... 156

***Ж.К. Кегенбеков, А.А. Кожрахметова***

Анализ и оценка эффективности инвестиций в развитие логистических систем ..... 166

***Д.Н. Сухарев***

Актуальные задачи научных исследований в области управления развитием транспортного комплекса ..... 175

***Ю.Н. Уртминцев, В.И. Минеев***

Современное состояние и перспективы речных пассажирских перевозок в Волжском бассейне ..... 188

## ***Эксплуатация водного транспорта, судовождение и безопасность судоходства***

***Ю.И. Платов***

Оценка эффективности комбинированных судов ..... 196

## ***Водные пути, порты и гидротехнические сооружения***

***М.А. Матюгин, Д.А. Мильцын, М.А. Решетников***

Натурные исследование уровня режима р. Волга в нижнем бьефе Нижегородской ГЭС ..... 208

## ***Экологическая безопасность***

***А.Е. Пластинин, А.Н. Каленков***

Прогнозирование разливов нефти с судов в Оленекском заливе ..... 217

***Е.А. Шильникова, О.В. Рослякова***

Процесс моделирования разложения нефтепродуктов в воде ..... 229

# CONTENTS

## ***Shipbuilding, ship repair and ecological safety of the ship***

<b><i>Aleksey N. Berdnik</i></b> Conversion of a military vessel into a civilian refrigerated vessel .....	15
<b><i>Alexander L. Gusev, Evgeniy A. Pershin</i></b> Investigation of the hydrodynamic characteristics of the elements of the multidimensional seismic streamer diversion system.....	27
<b><i>Svetlana V. Davydova, Konstantin P. Mochalov</i></b> The method of automated formation of the ship surface of a tugboat .....	36
<b><i>Sergey A. Kazmin, Aleksey V. Lobanov, Sergey V. Verbitskiy</i></b> Overview of the classification of mobile offshore semi-submersible drilling units by generations.....	51
<b><i>Maksim V. Kitaev, Igor A. Novoseltsev</i></b> Application of multicriteria optimization methods for solving the problem of ship design.....	66
<b><i>Alexey E. Korepanov, Evgeniy P. Ronnov</i></b> Calculation of the mass load of a passenger river trimaran in research design problems .....	76
<b><i>Vadim V. Kramar, Anna V. Rodkina, Olga A. Ivanova, Veronika R. Dushko</i></b> Microscopy studies of the surface layer of steel in the area of variable waterline of vessels and ocean technical facilities .....	84
<b><i>A.A. Khlybov, D.A. Ryabov, A.A. Solovyov, M.S. Anosov, Yu.I. Matveev</i></b> The effect of plastic deformation on the structure and properties of 20CRMNSI steel obtained by additive electric arc cultivation .....	95
<b><i>Egor Yu. Cheban, Andrey N. Luchkov</i></b> Numerical simulation of tests of ekranoplan composite wing in a wind tunnel .....	108

## ***Ship power equipment***

<b><i>Viacheslav L. Konyukov</i></b> Comparison of main engine tension indicators tow-pusher when working in towing and pushing modes .....	118
<b><i>Yuriy I. Matveev, Nikolai A. Laptev, Vladimir V. Kolyvanov, Michael Y. Khrarov</i></b> Natural gas as an alternative to liquid hydrocarbons on diesel-powered vessels.....	127
<b><i>Ivan L. Titov</i></b> Investigation of an unconventional exciter of a toothed stator using software with finite element method.....	136

## ***Economics, logistics and transport management***

<b><i>Marina V. Botnaryuk, Elena Yu. Grass</i></b> Methodological bases for assessing the transport and logistics customer service quality of a marine terminal operator.....	145
<b><i>Alexander I. Gavrilov, Ivan I. Streltsov, Wu Xiangyu</i></b> Modernization of the transport system in the Asian-Russian sector as the basis for global economic restructuring security .....	156

<b><i>Zh.K. Kegenbekov, A.A.Kozhakhmetova</i></b>	
Analysis and evaluation of the investments effectiveness in the logistics systems development.....	166
<b><i>Dmitry N. Sukharev</i></b>	
Current tasks of scientific research in the field of transport complex development management.....	175
<b><i>Yuri N. Urtmintsev, Valery I. Mineev</i></b>	
Current State and Prospects of River Passenger Transportation in the Volga Basin .....	188
 <b><i>Operation of water transport, navigation and safety of navigation</i></b>	
<b><i>Juri I. Platov</i></b>	
Evaluation of combined ships efficiency .....	196
 <b><i>Waterways, ports, and hydraulic engineering constructions</i></b>	
<b><i>Michail A. Matugin, Dmitry A. Miltsin, Maxim A. Reshetnikov</i></b>	
Full-scale study of the Volga river level regime in the lower reaches of Nizhny Novgorod HPS .....	208
 <b><i>Ennvironmental safety</i></b>	
<b><i>Andrey E. Plastinin, Aleksandr N. Kalenkov</i></b>	
Forecasting oil spills from ships in Oleneksky Bay .....	217
<b><i>Ekaterina A. Shilnikova, Oksana O. Roslyakova</i></b>	
The process of modeling the decomposition of petroleum products in water.....	229

## **СУДОСТРОЕНИЕ, СУДОРЕМОНТ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СУДНА**

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

УДК 629.12

DOI: 10.37890/jwt.vi75.362

#### **Переоборудование судна военного назначения в гражданское судно-рефрижератор**

**А.Н. Бердник**

*ORCID: 0000-0003-4043-8085*

*Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия*

**Аннотация.** Речной транспорт является одним из старейших в Российской Федерации. Он имеет особое значение для северных и восточных районов, где недостаточно высокая плотность железных и автомобильных дорог, или же они вообще отсутствуют. В этих регионах доля речного транспорта в общем грузообороте составляет около четырёх процентов. Использование речного водного транспорта в военных целях никогда не будет прекращено. Так как к военному транспорту предъявляются более жёсткие требования, то списание этих судов происходит быстрее, чем при коммерческом использовании. В большинстве случаев техническое состояние судна не является критическим, и его можно далее эксплуатировать. Ввиду того, что утилизация достаточно дорогой процесс, суда простаивают и не используются по назначению. Выходом из данной ситуации может послужить применение списанных военных судов в коммерческих целях путём переоборудования их в рефрижератор с целью продления эксплуатационного срока службы судна, улучшения технико-экономических показателей судна и получения прибыли. С точки зрения методического подхода выполнен анализ существующих рефрижераторных контейнеров, приведены дополнительные устройства для преобразования электроэнергии, разработан технологический процесс изготовления рамы установки рефрижератора и проведён её прочностной расчёт. Показана экономическая целесообразность от переоборудования судна в рефрижератор.

**Ключевые слова:** речной транспорт, переоборудование судна, рефрижераторный контейнер, судовая электростанция, остойчивость судна, рама, экономический эффект.

#### **Conversion of a military vessel into a civilian refrigerated vessel**

**Aleksey N. Berdnik**

*ORCID: 0000-0003-4043-8085*

*Pacific National University, Khabarovsk, Russia*

**Abstract.** River transport is one of the oldest in the Russian Federation. It is of particular importance for the northern and eastern regions, where the density of railways and highways is not high enough, or they do not exist at all. In these regions, the share of river transport in the total cargo turnover is about four percent. The use of river water transport for military

purposes will never be stopped. Since requirements that are more stringent are imposed on military transport, the decommissioning of these vessels is faster than in commercial use. In most cases, the technical condition of the vessel is not critical, and it can be further operated. In view of the fact that recycling is a rather expensive process, ships are idle and are not used for their intended purpose. The way out of this situation can be the use of decommissioned military vessels for commercial purposes by converting them into a refrigerator in order to extend the operational life of the vessel, improve the technical and economic indicators of the vessel and make a profit. From the point of view of the methodological approach, the analysis of existing refrigerated containers was carried out, additional devices for converting electric power were given, the technological process of manufacturing the frame of the refrigerator installation was developed, and its strength calculation was carried out. The economic feasibility of converting the vessel into a refrigerator is shown.

**Keywords:** river transport, conversion of a vessel, refrigerated container, vessel power station, vessel stability, frame, economic effect.

### **Введение**

Военная промышленность не стоит на месте и постоянно развивается. Создаются новые типы и виды вооружения, которые сменяют старые, морально устаревшие и изжившие себя. Военно-морской флот не является исключением: появляются новые, современные, высокотехнологичные боевые суда, которые заменяют уже отжившие своё. Как правило, списанные военные единицы превращаются в музеи либо в металлолом. Но нередко списанное судно остаётся в хорошем техническом состоянии, что обуславливает возможность его дальнейшего использования в мирных целях.

Российский военный флот состоит из разнообразных типов кораблей, некоторые из которых вполне пригодны для перевозки определённого рода грузов. Актуальность данного направления заключается в том, что списанное судно, даже с учётом вложений в модернизацию, обойдётся дешевле, чем покупка нового. А при дальнейшей его эксплуатации как коммерческого транспорта появляется возможность получения прибыли, которая вначале будет покрывать затраты на модернизацию, а затем приносить чистый доход. Поэтому целью данной работы является переоборудование списанного судна военного назначения для перевозки рефрижераторного контейнера с модернизацией вспомогательных энергетических установок и получение прибыли от перевозок.

Следует констатировать, что в настоящее время существуют варианты решения обратной задачи, т. е. переоборудование гражданского судна в нужды ВМФ [1,2]. Но цель, поставленная в данной работе, формулируется впервые, и публикации, отражающие подобные идеи, отсутствуют.

### **Объект исследования**

Объектом исследования является десантный катер проекта Т-4М с открытым трюмом и носовой аппарелью, предназначенный для приёма генеральных и других грузов, а также самоходной техники весом до 50 тонн (с соответствующими размерами трюма и положения центра тяжести) с транспортов в условиях открытых рейдов, выгрузки их как на оборудованный, так и на необорудованный берег, либо погрузки этих же грузов с берега на транспорт. Тип судна двухпалубное, двухвинтовое, с надстройкой и мостиком, машинное отделение в кормовой части [3,4].

Чертеж общего вида судна проекта Т-4М показан на рис.1, а его основные параметры представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Основные параметры судна проекта Т-4М**

Параметр	Единицы измерения	Численное значение
Численность экипажа	чел.	4
Дедвейт	т	50
Полное водоизмещение	т	118,25
Длина	м	20,3
Ширина	м	5,51
Высота борта	м	2,06
Осадка	м	1,44
Запасы топлива	т	4
Водяной балласт	т	16,8
Суммарная мощность главных двигателей	кВт	440
Максимальная скорость вперед	м/с	5,14
Максимальная скорость назад	м/с	4,42

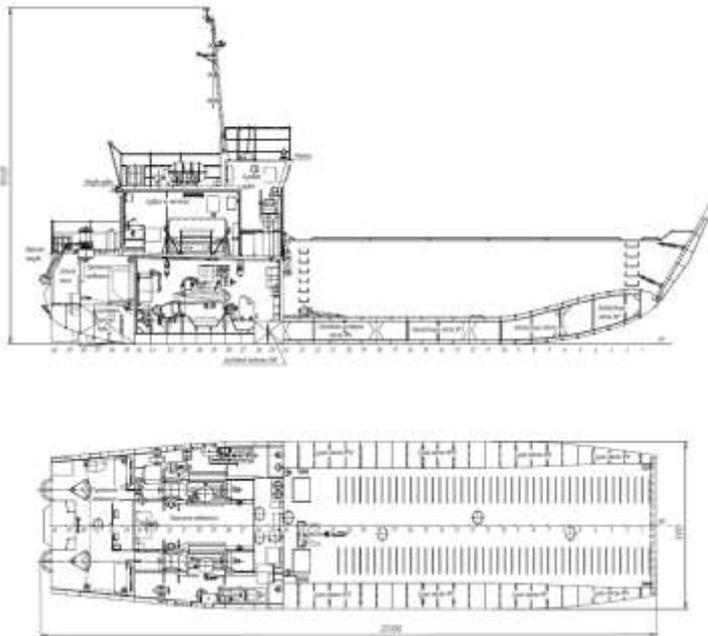


Рис. 1. Чертеж общего вида судна проекта Т-4М

В качестве главных энергетических установок используются два дизель-редукторных агрегата СДРА-300.1-М3 на базе двигателей 3Д12А и 3Д12АЛ. Последний отличается противоположным направлением вращения коленчатого вала.

Вспомогательная электроэнергетическая установка состоит из двух дизель-генераторов ДГПК-8/1500-1 и ДГПН-8/1500-1 на базе двигателя 5Д2 и электрогенератора М-61М. Вырабатываемый электрический ток – постоянный 220 В.

Источниками электроэнергии постоянного тока 24 В являются два генератора Г-732В мощностью 1,2 кВт каждый, навешенные на главные двигатели ЗД12Л и поставляемые комплектно с ними.

### Выбор рефрижераторного контейнера

Для перевозки на близкие и дальние расстояния скоропортящихся продуктов питания (мясо, рыба, фрукты, овощи) и товаров, требующих соблюдения определенного температурного режима и влажности (лекарства, растения, химические препараты) используются рефрижераторные контейнеры.

В конечном итоге выбор рефрижераторного контейнера сводится к выбору по типоразмеру, компрессору, контроллеру и состоянию. Остальные параметры также необходимо учитывать, но они будут не принципиально влиять на конечную цель [5,6].

В связи с обеспечением доступа к холодильной установке, находящейся в торцевой части, типоразмер контейнера следует взять не более 20 футов. Для наглядного сравнения особенностей и окончательного выбора в табл. 2 представлены два контейнера разных производителей. На рис. 2 показан общий вид рефрижераторного контейнера с габаритными размерами.

На основании данных, представленных в табл. 2 видно, что различий в данном типоразмере рефрижераторных контейнеров немного. После сравнения был выбран рефрижераторный контейнер фирмы Thermo King (SEBU 316810-7). Основная причина выбора данного контейнера – наличие более современного спирального компрессора, имеющего такие положительные черты как пониженная шумность, отсутствие потребности в обслуживании и повышенный коэффициент полезного действия.

Таблица 2

Параметры контейнеров

Параметр	Производитель			
	Thermo King		Carrier	
Типоразмер	20' (20 футов)			
Модель	SEBU 316810-7	RRSU 6713360	ALLU 5689939	SEBU 316810-7
Контроллер	CSR 40		MicroLink 2i	
Тип компрессора	Спиральный		Поршневой	
Габариты, мм:				
длина	6058			
ширина	2438			
высота	2896			
Внутренние размеры, мм:				
длина	5513			
ширина	2284			
высота	2557			
Дверные проёмы, мм:				
ширина	2416			
высота	2471			
Объём, м <sup>3</sup>	28			
Температурный режим, °С	от -25 до +25			
Энергопотребление, кВт/ч	5	5	4,4	5
Подключение	380/460 В ±10 % / 3 фазы / 50-60 Гц ±2.5 %			
Грузоподъёмность, т	21,95			
Вес контейнера, т	3,05			

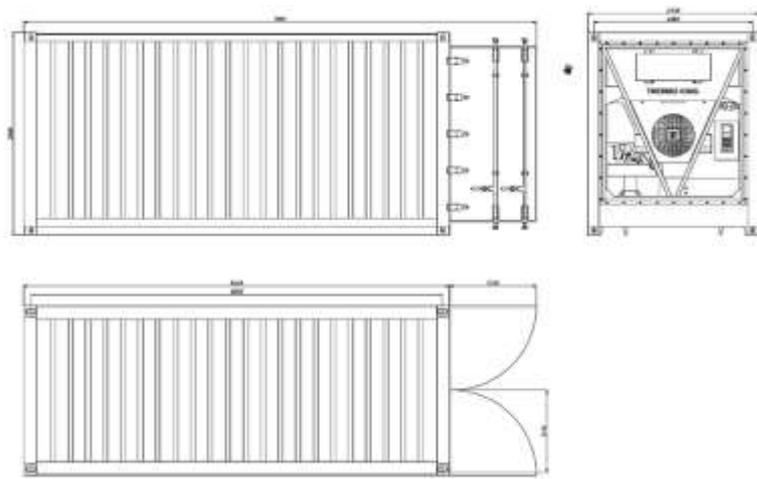


Рис. 2. Общий вид рефрижераторного контейнера

### **Разработка каркаса рамы**

Специфическая криволинейная форма в носу палубы грузового пространства судна проекта Т-4М не позволяет просто и быстро установить контейнер через специальные опоры – фитинги-основания. Поэтому требуется разработать специальную каркасную раму для удобного и быстрого крепления рефрижераторного контейнера на судне.

Для осуществления этой операции были проанализированы различные строительные металлоконструкции и готовые решения, изучен сортамент стали, составлено несколько версий решения данной проблемы, и создана финальная версия конструкции [7,8].

Первая версия предполагала, что в основаниях будут широкополочные двутавры, но такая реализация очень затратная и имела бы очень большой вес. Во второй версии предполагалось использовать колонные основания. Они позволили бы значительно уменьшить вес и затраты на установку, но для поддержания устойчивости колонн понадобились дополнительные балки, которые обеспечивали бы достаточную устойчивость и жёсткость конструкции. В третьей версии в качестве дополнительных балок («связей») использовались профильные трубы различных сечений, они и позволили создать достаточную жёсткость конструкции. В дальнейшем было проработано крепление самой рамы к палубе. Крепление осуществляется через две пластины, в которых просверлены отверстия и нарезана резьба, позволяющая закрепить раму с помощью болтов или шпилек и гаек. Одна из пластин приваривается к палубе, а вторая – непосредственно к основным и дополнительным колоннам. На рис. 3 показан чертёж рамы под рефрижераторный контейнер.

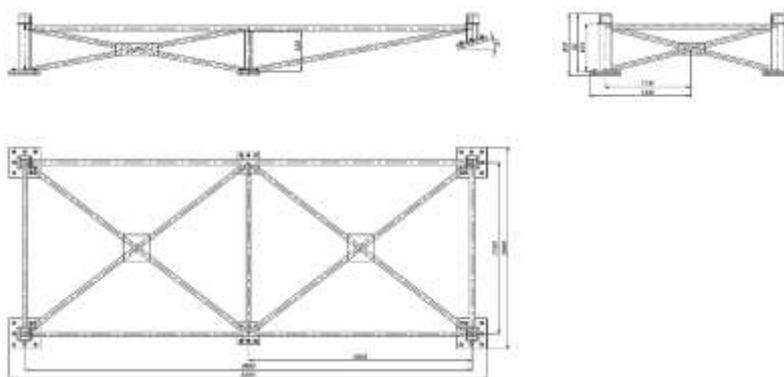


Рис. 3. Чертеж рамы под рефрижераторный контейнер

В конструкции, представленной на рис. 3, используются профильные трубы квадратного сечения 60x60x4 ГОСТ 30245-2003, колонные двутавры 16ДК2 и 10ДК1 ГОСТ Р 57837-2017, металлические пластины 5, 10 20 и 35 мм из листовой стали ГОСТ 19903, а также фитинг-основание Twistlock foundations TF-11.

Все оси металлических балок приходят в одну точку, что говорит о правильности проектирования конструкции. Металлические пластины на пересечениях «связей» позволяют усилить конструкцию и не допустить разрушения сварных швов. Отверстия под крепление рамы сделаны так, чтобы при крене судна они смогли выдержать наклонившийся контейнер. Допустимый диаметр резьбы в пластинах 400x400 мм 24 мм по СП 16.13330.2017. Между пластинами предусмотрена прокладка из текстолита толщиной 5 мм для уменьшения появления коррозии в месте соединения. При соединении рамы болтами дополнительно используются шайбы для увеличения площади контакта, а также пружинная шайба для уменьшения вероятности ослабления соединения.

После изготовления рамы наносится антикоррозионное покрытие. Для этого используется лакокрасочный материал на основе сополимеров винилхлорида (ХВ, ХС). Преимуществами, которыми обладает данный материал, являются: возможность нанесения при отрицательных температурах (до -10 °С), быстрое высыхание, хорошая водо- и атмосферостойкость, высокая эластичность и прочность при ударе, простота ремонта.

Контейнер крепится к раме с помощью ручного поворотного замка Twistlock CV-8 Съёмная конструкция контейнера может быть удобна при погрузке краном или замене контейнера.

Сборка рамы производится в цеху и доставляется на судно для монтажа. При монтаже нижняя пластина приваривается к судну по контуру, а после устанавливается соосность пластин, просверливаются отверстия и нарезается резьба по месту. Данное решение поможет избежать проблем с установкой рамы, так как палуба грузового пространства может иметь неровности, приобретенные в процессе эксплуатации.

Выполнение расчёта рамы на прочность производились в программном комплексе Лира-САПР. На рис. 4 изображена расчётная схема рамы с пронумерованными элементами конструкции и приложена нагрузка. Схема формируется из готовой конструкции линиями, упрощённо обозначаются все металлические детали. Вводятся обозначения сортамента стали для той или иной позиции.

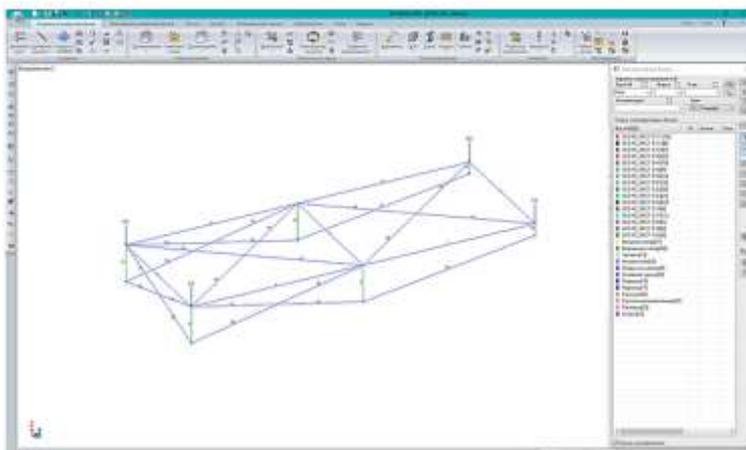


Рис. 4. Расчётная схема рамы

На рис. 5 показано, насколько перемещаются (прогибаются) элементы конструкции рамы. По шкале сверху можно определить критичность перемещений. Крайний левый сектор указывает на достаточно большие перемещения, и выход за пределы недопустим. Величина перемещений составляет 0,0671 мм, что является нормальным.

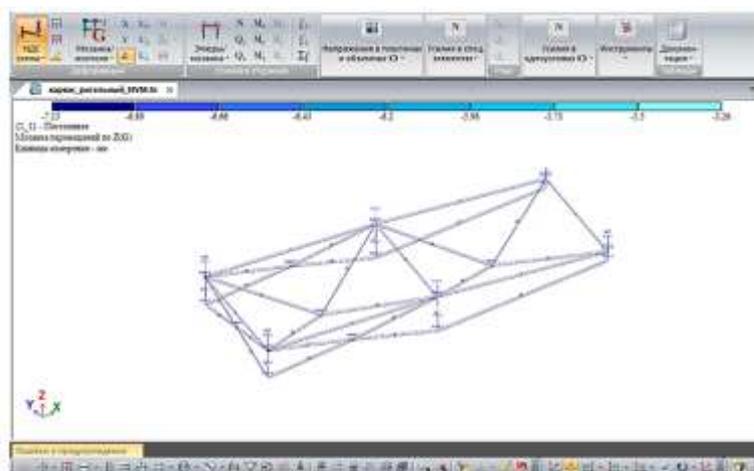


Рис. 5. Мозаика перемещений по оси Z

На рис. 6 представлена мозаика результатов проверки назначенных сечений по первому предельному состоянию. Нагрузка колонн составляет 12,3 и 11,3 %, что является допустимым результатом.

Таким образом, в процессе расчёта на прочность рамы было выяснено, что выбранный сортамент стали элементов конструкции соответствует приложенным на конструкцию рамы усилиям, обеспечивает устойчивость и запас прочности.

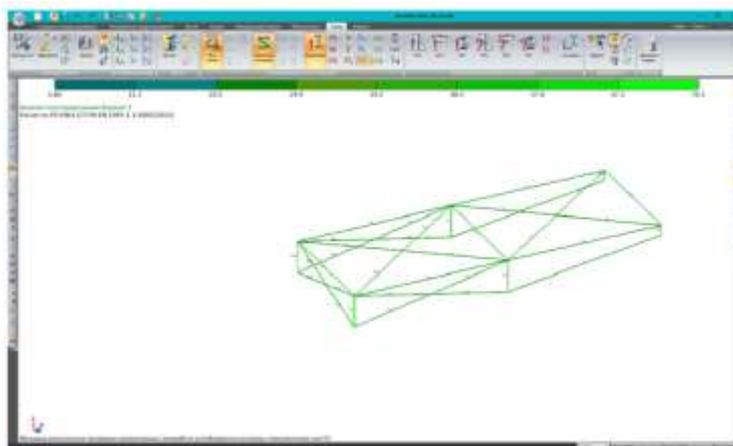


Рис. 6. Мозаика результатов проверки назначенных сечений по первому предельному состоянию

### **Расчёт мощности судовой электростанции и выбор дизель-генераторов**

В настоящее время существует несколько методов расчёта мощности судовой электростанции: эмпирический метод нагрузочных таблиц (табличный метод), вероятностно-статистический метод, аналитический метод и ряд других. В настоящей работе использовался один из самых распространённых методов – табличный. В данном методе строится таблица нагрузок, в которую вносятся все потребители, их номинальные данные и на основании этой таблицы выбирается число и мощность генераторов [9,10].

Расчёт мощности судовой электростанции производился только для потребителей электрического тока 220 В, так как дизель-генераторы, подлежащие замене, работают в этой сети напряжения от распределительного щита РЩ 220, а остальные потребители от сети 24 В и отдельного распределительного щита РЩ 24, источником электроэнергии которого является навесной генератор главного двигателя. Также в расчёт включался новый потребитель – рефрижераторный контейнер, которым будет оснащено данное судно.

Выше было сказано, что вспомогательная энергетическая установка состоит из двух дизель-генераторов и электрогенератора. Вырабатываемый электрический ток постоянным напряжением 220 В, а источниками электроэнергии постоянного тока напряжением 24 В являются два генератора Г-732В мощностью 1,2 кВт каждый, навешенные на главные двигатели ЗД12Л и поставляемые комплектно с ними. Часть потребителей работают от 220 В, а часть от 24 В. Генераторы, вырабатывающие электрический ток напряжением 24 В заменяться не будут, так как являются агрегатами главных двигателей и не относятся к вспомогательным дизель-генераторам [11,12].

Первое, с чем нужно определиться при выборе нового дизель-генератора – род тока. Все механизмы на данном судне питаются постоянным током и логичным вариантом было выбрать генератор, работающий на постоянном токе, но при включении в список потребителей рефрижераторного контейнера, которому требуется переменный ток, вариант генератора переменного тока стал актуальным.

Основное преимущество переменного тока по сравнению с постоянным заключается в возможности с помощью трансформаторов повышать или понижать напряжение, с минимальными потерями передавать электрическую энергию. Кроме того, генераторы и двигатели переменного тока более просты по устройству,

надёжней в работе и проще в эксплуатации по сравнению с агрегатами постоянного тока. Небольшим преимуществом можно назвать подключение новых приборов, работающих на переменном токе.

Второй параметр, с которым необходимо определиться – величина напряжения. Как было сказано выше, дизель-генераторы вырабатывают ток напряжением 220 В, следовательно, все потребители работают в этом напряжении. Если рассматривать рефрижераторный контейнер, то его работа с напряжением 220 В невозможна, так как контейнеру необходимо трёхфазное питание с напряжением 380 В.

В конечном итоге были выбраны дизель-генераторы, вырабатывающие трёхфазный переменный ток напряжением 380 В. Электропитание рефрижераторного контейнера будет производиться без применения преобразователей, а для остальных потребителей электрический ток будет преобразовываться в постоянный напряжением 220 В. Сначала будет изменяться напряжение с 380 до 220 В путём применения понижающего трансформатора, далее ток будет преобразовываться в постоянный при помощи специальных устройств – выпрямителей. Наконец, «выпрямленный» ток проходит через фильтрацию для снижения пульсаций.

Для выбора новых дизель-генераторов необходимо учесть, чтобы они были экономичнее и не превышали габаритные размеры штатных. При этом должна обеспечиваться мощность не менее той, что была получена при расчёте судовой электростанции. Необходимо также обратить внимание на ресурс до капитального ремонта.

Согласно требованиям морского и речного регистров на судне должны быть установлены два основных источника электроэнергии; в случае выхода одного из них, другой должен обеспечить работу основных механизмов судна.

На основании проведённого анализа технико-экономических показателей различных дизель-генераторов был выбран дизель-генераторный агрегат CCFJ12J-W2 на базе двигателя Weichai WP2.1CD18E10 и генератора Marathon MP-H-12-4.

Генераторные установки вырабатывают трёхфазный ток с напряжением 380 В, но не все потребители могут использовать электроэнергию с такими параметрами. Для того, чтобы осуществить работу всех потребителей, требуется преобразовать электроэнергию до необходимых технических характеристик механизмов и устройств. Преобразование электроэнергии будет производиться с помощью трансформатора, понижающего напряжение до 220 В и выпрямительного агрегата.

По правилам Российского Классификационного Общества судно должно быть оборудовано двумя сухими трансформаторами, но для судов длиной менее 23 м разрешено использовать один трансформатор. В данном случае подходит трансформатор ТСЗМ-40-74.ОМ5 и выпрямительный агрегат ВА22030. Трансформатор соответствует требованиям морского и речного регистра судоходства и МЭК в части судового электрооборудования [10,11,12,13].

Следует отметить, что при рассмотрении монтажа новых дизель-генераторов в машинном отделении судна произошли следующие существенные изменения:

- 1) 1. Амортизаторы при установке дизель-генераторов. В соответствии с нагрузкой на один амортизатор, а она составила 785 Н, был выбран амортизатор АКСС-85М с максимальной рабочей нагрузкой 833 Н.
- 2) 2. Судовой фундамент. Установка дизель-генератора выполняется на доработанный существующий судовой фундамент демонтированного старого дизель-генератора. Агрегат в объёме поставки установлен на собственной раме. Крепится на судовой фундамент через амортизаторы с помощью шести болтов с пружинными шайбами на стальных прокладках. Заземление осуществляется на корпус судна при помощи заземляющей перемычки.

### Результаты исследования

На рис. 7 представлена схема монтажа рефрижераторного контейнера на судне.

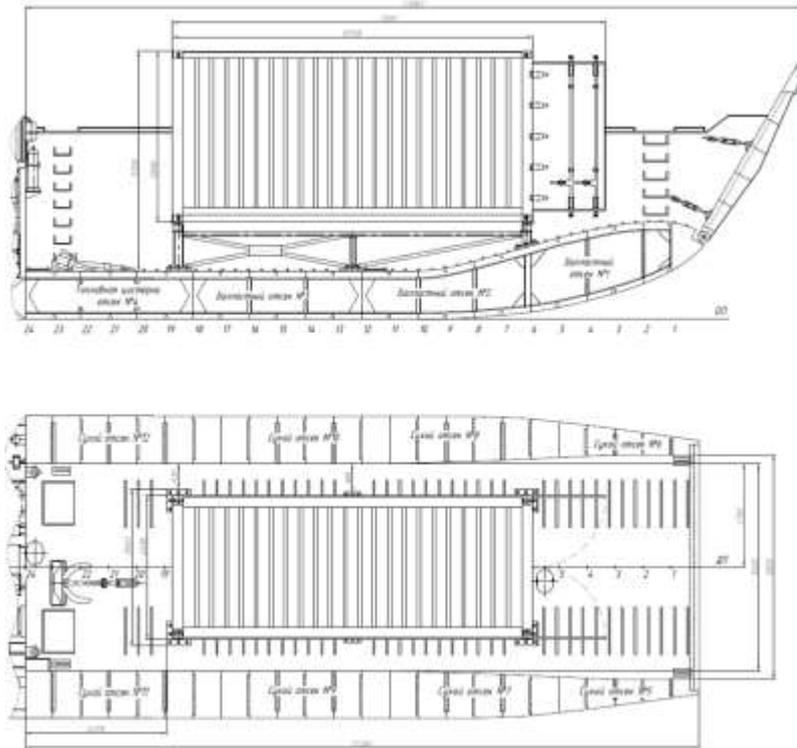


Рис. 7. Схема монтажа рефрижераторного контейнера на судне

После моделирования монтажа рефрижераторного контейнера на судне был произведён расчёт судна на остойчивость. Расчёт и обработка диаграммы остойчивости показывает, что требования РКО к остойчивости судна обеспечены, а именно: начальная метацентрическая высота  $h = 1,11$  м, угол заката диаграммы  $68,8^\circ$ , угол максимума диаграммы  $30,6^\circ$ , максимальное плечо остойчивости  $l_{max} = 0,38$  м.

По результатам исследования был выполнен расчёт экономического эффекта и срока окупаемости при переоборудовании судна проекта Т-4М в рефрижератор. Экономический эффект при эксплуатации переоборудованного судна может достигать до 7000000 руб. в год, а срок окупаемости составил 3,43 года.

### Заключение

Из вышесказанного видно, что переоборудование списанных судов военного назначения, а именно судна проекта Т-4М, для перевозки контейнера, в частности рефрижераторного, модернизации вспомогательных энергетических установок для соответствия новым требованиям и получения прибыли от перевозок является одним из перспективных направлений для решения задачи экономического и хозяйственно-бытового плана. Очевидно, что данный подход к переоборудованию судна военного назначения в гражданское требует дальнейшего научно-практического исследования.

### Список литературы

1. Поваляев А.А., Бесперстов С.А. Современные тенденции переоборудования гражданских судов для использования в интересах ВМФ // Актуальные проблемы военно-научных исследований, № 6 (7), 2020. С. 84-97.
2. KORABEL.RU [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.korabel.ru/news/comments/konversiya\\_v\\_deystvii\\_boevye\\_korabli\\_iz\\_konteynerovozov\\_i\\_tankerov.html](https://www.korabel.ru/news/comments/konversiya_v_deystvii_boevye_korabli_iz_konteynerovozov_i_tankerov.html) (дата обращения 15.04.2023).
3. Апальков Ю.В. Корабли ВМФ СССР. Справочник в четырех томах. Том IV. Десантные и минно-тральные корабли. – СПб.: Галяя Принт, 2007. – 188 с.
4. Кузин В.П., Никольский В.И. Военно-Морской Флот СССР 1945-1991. – СПб.: Историческое Морское Общество, 1996. – 653 с.
5. Бердник А.Н. Холодильные установки и системы кондиционирования воздуха. – Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2021. – 101 с.
6. Корнилов Э.В. Бойко П.В. Белый В.Н. Голофастов Э.И. Рефрижераторный контейнер. – Одесса: Ассоциация морских инженеров-механиков, 2008. – 152 с.
7. Справочник проектировщика. Металлические конструкции. Том 1. / под ред. В.В. Кузнецова. – М.: АСВ, 1998. – 576 с.
8. Андреев В.В. Материаловедение для судостроителей. – Л.: Судостроение, 1981. – 248 с.
9. Кузнецов С.Е. Основы эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматизации. – М.: Транспорт, 1991. – 231 с.
10. Богомолов В.С. Судовые электрические системы и их эксплуатация. – М.: Мир, 2006. – 320 с.
11. Роджеро Н.И. Справочник судового электромеханика и электрика. М.: Транспорт, 1986. – 311 с.
12. Баранов В.В. Монтаж, техническое обслуживание и ремонт судовых энергетических установок. – СПб.: Судостроение, 2011. – 352 с.
13. Харин В.М. Судовые вспомогательные механизмы. – М.: Транспорт, 1992. – 319 с.

### References

1. Povalyaev A.A., Besperstov S.A. *Sovremennyye tendentsii pereoborudovaniya grazhdanskih sudov dlya ispol'zovaniya v interesah VMF* [Modern trends in the conversion of civilian vessels for use in the interests of the Navy]. *Aktual'nye problemy voenno-nauchnyh issledovaniy* [Actual problems of military scientific research]. No. 6 (7), 2020. pp. 84-97. (In Russ).
2. KORABEL.RU [Electron. Resource]. – Available at: [https://www.korabel.ru/news/comments/konversiya\\_v\\_deystvii\\_boevye\\_korabli\\_iz\\_konteynerovozov\\_i\\_tankerov.html](https://www.korabel.ru/news/comments/konversiya_v_deystvii_boevye_korabli_iz_konteynerovozov_i_tankerov.html) (accessed 15.04.2023).
3. Apalkov Yu.V. *Korabli VMF SSSR. Spravochnik v chetyrekh tomakh. Tom IV. Desantnye i minno-tralnye korabli* [Ships of the USSR Navy. Handbook in four volumes. Amphibious and minesweeping ships]. St. Petersburg: Galea Print Publ, 2007. Vol. 4. 188 p. (In Russ).
4. Kuzin V.P., Nikolsky V.I. *Voенно-Morskoi Flot SSSR 1945-1991* [The USSR Navy 1945-1991]. St. Petersburg: Historical Maritime Society Publ, 1996. 653 p. (In Russ).
5. Berdник A.N. *Kholodilnye ustanovki i sistemy konditsionirovaniia vozdukha* [Refrigeration units and air conditioning systems]. Khabarovsk: Pacific National University, 2021. 101 p. (In Russ).
6. Kornilov E.V. Boyko P.V. Bely V.N. Golofastov E.I. *Refrizheratornyi konteiner* [Refrigerated container]. Odessa: Association of Marine Mechanical Engineers Publ, 2008. 152 p.
7. Kuznetsov V.V. *Spravochnik proektirovshchika Metallicheskie konstruksii Tom. 1* [Designer's Handbook. Metal constructions]. Moscow: ASB Publ, 1998. 576 p. (In Russ).
8. Andreev V.V. *Materialovedenie dlia sudostroitelei* [Materials science for shipbuilders]. Leningrad: Shipbuilding Publ, 1981. 248 p. (In Russ).
9. Kuznetsov S.E. *Osnovy ekspluatatsii sudovogo elektrooborudovaniia i sredstv avtomatizatsii* [Fundamentals of operation of ship electrical equipment and automation equipment]. Moscow: Transport Publ, 1991. 231 p. (In Russ).
10. Bogomolov V.S. *Sudovye elektricheskie sistemy i ikh ekspluatatsiia* [Ship electrical systems and their operation]. Moscow: Mir Publ, 2006. 320 p. (In Russ).

11. Rogero N.I. *Spravochnik sudovogo elektromekhanika i elektrika* [Handbook of marine electrical engineer and electrician]. Moscow: Transport Publ, 1986. 311 p. (In Russ).
12. Baranov V.V. *Montazh tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont sudovykh energeticheskikh ustanovok* [Installation, maintenance and repair of marine power plants]. St. Petersburg: Shipbuilding Publ, 2011. 352 p. (In Russ).
13. Kharin V.M. *Sudovye vspomogatelnye mekhanizmy* [Ship auxiliary mechanisms.]. Moscow: Transport Publ, 1992. 319 p. (In Russ).

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

**Бердник Алексей Николаевич**, к.т.н.,  
доцент, доцент кафедры двигателей  
внутреннего сгорания, Тихоокеанский  
государственный университет (ФГБОУ ВО  
«ТОГУ»), 680035, г. Хабаровск, ул.  
Тихоокеанская, 136, e-mail:  
alex.bdk75@yandex.ru

**Aleksey N. Berdnik**, Ph.D. in Technical  
Sciences, Associate Professor of the Department  
Internal Combustion Engines, Pacific National  
University, 136 Tikhookeanskaya st, Khabarovsk,  
680035

Статья поступила в редакцию 07.02.2023; опубликована онлайн 20.06.2023.  
Received 07.02.2023; published online 20.06.2023.

УДК 629.564.3: 629.58

DOI: 10.37890/jwt.vi75.370

## **Исследование гидродинамических характеристик элементов системы отведения многомерной сейсмической косы**

**А.Л. Гусев<sup>1</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0922-6830>

**Е.А. Першин<sup>1</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7866-293X>

<sup>1</sup>*Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия*

**Аннотация.** Сейсмические методы являются одними из основных источников информации о глубинном строении земной коры, покрытой водной поверхностью. Перспективной областью применения остаётся изучение геологического строения акваторий, в том числе для установления мест залежей нефти, газа и прочих полезных ископаемых. Несмотря на лидирующие позиции Российской Федерации в мире по добыче нефти и газа с морских шельфов, техническое перевооружение сейсморазведочного флота осуществляется медленно и за счёт вторичного рынка. В настоящей работе рассмотрены некоторые вопросы проектирования сейсмических кос. Объектом исследований являются сейсмические косы, состоящие из геофонов, последовательно соединённых секциями в одну или несколько линий (кос). Для более детального изучения геологических объектов и слежения за параметрами волнового поля в процессе разработки месторождений актуальна многомерная (трехмерная) сейсморазведка, производимая сейсмокосой, состоящей из множества кос, разнесённых как по глубине, так и по ширине. При этом контакт между соседними косами недопустим. В настоящей работе приведены результаты расчётов гидродинамических сил, возникающих при буксировке элементов системы отведения многомерной сейсмической косы. Рассмотрен способ реализации многомерной сейсмической косы с использованием гидродинамических отводителей. Определена величина потребной площади несущей поверхности отводителя. Высказаны предположения по совершенствованию системы.

**Ключевые слова:** гидродинамическое сопротивление, сейсмическая коса, отводитель, пневмоисточник, трос, буксировка, динамика движения.

## **Investigation of the hydrodynamic characteristics of the elements of the multidimensional seismic streamer diversion system**

**Alexander L. Gusev<sup>1</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0922-6830>

**Evgeniy A. Pershin<sup>1</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7866-293X>

<sup>1</sup>*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI, Kazan, Russia*

**Abstract.** Seismic methods are one of the main sources of information about the deep structure of the earth's crust covered with water. A promising area of application remains the study of the geological structure of water areas, including for determining the location of deposits of oil, gas and other minerals. Despite the leading positions of the Russian

Federation in the world in the extraction of oil and gas from the sea shelves, the technical re-equipment of the seismic survey fleet is carried out slowly and at the expense of the secondary market. In this paper, some issues of designing seismic streamers are considered. The object of research is seismic streamers, consisting of geophones connected in series by sections into one or more lines (streamers). For a more detailed study of geological objects and tracking the parameters of the wave field in the process of field development, multidimensional (three-dimensional) seismic survey is relevant, carried out by a seismic streamer, consisting of many streamers spaced both in depth and in width. In this case, contact between neighboring streamers is not allowed. This paper presents the results of calculations of hydrodynamic forces that arise when towing elements of the diversion system of a multidimensional seismic streamer. A method for implementing a multidimensional seismic streamer using hydrodynamic diverters is considered. The value of the required area of the bearing surface of the diverter is determined. Assumptions are made to improve the system.

**Keywords:** hydrodynamic resistance, seismic streamer, diverter, pneumatic source, rope, towing, motion dynamics.

### **Введение**

Морские сейсмические косы применяются десятилетиями, например, для разведки нефти. Сопутствующее оборудование и технологии постепенно совершенствуются, чтобы соответствовать растущим требованиям к эффективности сбора и точности данных. Современные сейморазведочные работы проводятся путем буксировки нескольких кос с многочисленными датчиками за судном [1, 4, 5]. Косы обычно имеют длину 4 – 12 км, с внутрикосовым расстоянием до 25 м. Косы содержат многочисленные датчики давления, которые регистрируют звуковые волны, отраженные от земных пластов. Собранные данные используются для создания изображений местных донных структур. Исторически сложилось так, что для поддержания постоянной глубины косы использовались крылья с контролем глубины. Сегодня на косах устанавливаются крыльевые устройства, способные управлять как по глубине, так и по боковому расстоянию, обычно с интервалом ~300 м. Боковое управление важно, чтобы избежать контакта между соседними косами, а также для управления косами во время съемок 4D [2, 3, 6]. Как правило, замеры проводятся по линиям с поворотом всей косы на 180° в конце каждого замера. Этот маневр занимает много времени, а эффективное управление косами важно для поддержания разделения кос и предотвращения столкновений кос во время маневра. Исходя из этого, повсеместно разрабатываются имитаторы и имитационные модели кос на основе динамики буксируемого подводного кабеля. Реализация методами имитационного проектирования включает в себя такие функции, как управление крылом, хвостовым бумом и установленными источниками и, как правило, проверяется на основе опубликованных результатов моделирования из других кодов, коммерческого программного обеспечения и полномасштабных данных [7, 8, 11, 12]. С целью оценки или прогнозирования алгоритмы и модели сравниваются с реальными данными, что позволяет проводить работы по сокращению времени поворота при смене линии, либо по снижению воздействия на окружающую среду, либо по снижению операционных рисков.

Совершенствование методов изучения структуры морского дна привело к разработке систем трёхмерной сейморазведки. В этой системе за судном буксируются разнесённые по бортам две пьезокосы и две группы пневмоисточников или одна пьезокоса вдоль оси судна и две группы пневмоисточников по бокам. Для обеспечения установленного положения указанных элементов в систему буксировки вводятся два отводителя-заглубителя для пьезокосы, двадцать стабилизаторов глубины для пьезокосы, два отводителя для пневмоисточников и два хвостовых бум для пьезокосы [9, 10].

Сложной задачей при реализации этой системы является осуществление бокового отведения косы и пневмоисточников. Это отведение может быть осуществлено как с помощью специальной фермы, смонтированной на судне, так и с помощью упоминавшихся гидродинамических отводителей. В настоящей статье приводится гидродинамический расчёт, позволяющий сделать определённые выводы о практической реализуемости последнего способа отведения.

**Гидродинамический расчёт пневмоисточников**

Целью настоящего расчёта является определение боковой гидродинамической силы, обеспечивающей заданное отведение пневмоисточников. Пневмоисточники входят в состав системы в виде составного элемента. В зависимости от конфигурации системы они буксируются судном разнесёнными по бортам на 25 или 50 метров от кильватерной линии на глубине от 2 до 10 метров.

Каждая подгруппа источников состоит из следующих элементов:

Буксировочный трос, шт.	1
Жгут шлангов высокого давления, шт.	1
Пневмоисточник, шт.	10
Скоба подвески пневмоисточника, шт.	10
Цепи, соединяющие источники между собой, шт.	27
Цепи подвески пневмоисточников, шт.	20
Поддерживающий буй, шт.	10
Фал поддерживающего буя, шт.	10

Расчётная схема приведена на рис. 1. Потребная отводящая сила  $F_{отв}$  определяется гидродинамическим сопротивлением  $F_{сопр}$  и углом подхода ведущего троса.

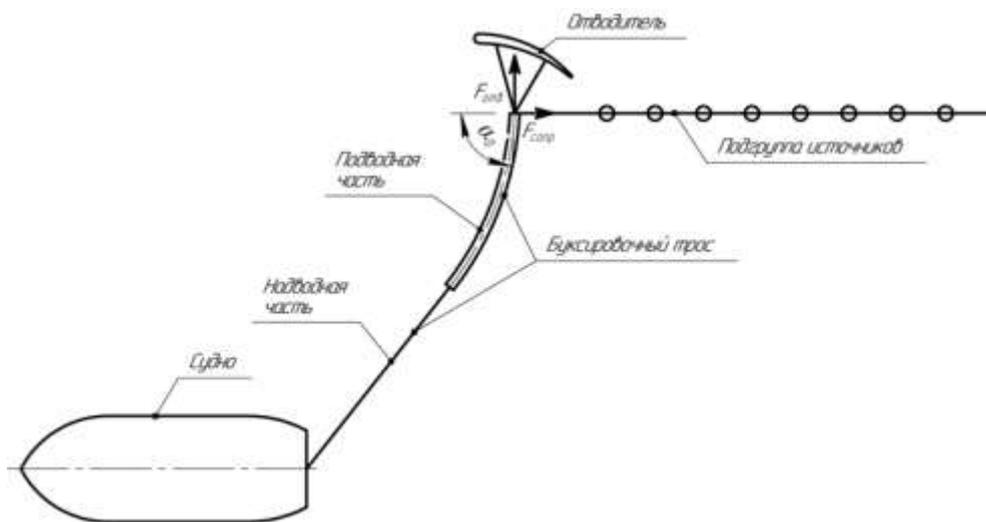


Рис. 1. Схема системы отведения многомерной сейсмической косы

В расчёте принято, что величина гидродинамического сопротивления подгруппы источников определяется суммой сопротивлений элементов системы. Интерференция

элементов не учитывается. При определении формы кабель-троса, соединяющего источники с судном, последний считается лежащим в одной плоскости и невесомым.

При расчёте сопротивления частей системы отведения многомерной сейсмической косы каждый элемент системы заменяется телом простой геометрической формы с известными из литературных источников гидродинамическими коэффициентами. Гидродинамическое сопротивление элементов рассчитывается с использованием сведений о значении коэффициентов сопротивления  $C_x$  из [1].

1. Буксировочный трос — заменяется цилиндром,  $l = 25$  м,  $d = 0,03$  м, ось вдоль потока,  $G_b = 140$  кгс,  $C_f = 0,003$ ,  $q = 450$  кгс/м<sup>2</sup>,  $S_{пов} = 2,35$  м<sup>2</sup>.

$$X = C_f q S_{пов} = 3,2 \text{ кгс.}$$

2. Жгут шлангов — заменяется цилиндром,  $l = 25$  м,  $d = 0,08$  м, ось вдоль потока,  $G_b = 0$  кгс,  $C_f = 0,003$ ,  $q = 450$  кгс/м<sup>2</sup>,  $S_{пов} = 6,3$  м<sup>2</sup>.

$$X = C_f q S_{пов} = 8,5 \text{ кгс.}$$

3. Пневмоисточник — заменяется цилиндром,  $l = 0,65$  м,  $d = 0,22$  м, ось поперёк потока,  $G_b = 40$  кгс,  $C_x = 0,7$ ,  $q = 450$  кгс/м<sup>2</sup>,  $S_{сеч} = 0,14$  м<sup>2</sup>.

$$X = C_x q S_{сеч} = 45 \text{ кгс.}$$

4. Скоба подвески — заменяется цилиндром с криволинейной осью,  $l = 0,7$  м,  $d = 0,07$  м, ось поперёк потока,  $G_b = 20$  кгс,  $C_x = 0,8$ ,  $q = 450$  кгс/м<sup>2</sup>,  $S_{сеч} = 0,049$  м<sup>2</sup>.

$$X = C_x q S_{сеч} = 18 \text{ кгс.}$$

5. Соединительная цепь — заменяется набором цилиндров, расположенных вдоль и поперёк потока, 80 цилиндров  $d = 0,01$  м,  $l = 0,06$  м — вдоль потока,  $C_{хв} = 0,84$ ,  $S_{сеч в} = 0,000078$  м<sup>2</sup>; 40 цилиндров  $d = 0,01$  м,  $l = 0,04$  м — поперёк потока,  $C_{хп} = 0,72$ ,  $S_{сеч п} = 0,0004$  м<sup>2</sup>,  $G_b = 4$  кгс,  $q = 450$  кгс/м<sup>2</sup>.

$$X = (C_{хв} S_{сеч в} N_b + C_{хп} S_{сеч п} N_p) q = 7,5 \text{ кгс.}$$

6. Цепь подвески — заменяется набором цилиндров, расположенных поперёк потока, 20 цилиндров  $d = 0,01$  м,  $l = 0,06$  м — один за другим,  $C_{хд} = 0,23$ ,  $S_{сеч} = 0,0006$  м<sup>2</sup>; 20 цилиндров  $d = 0,01$  м,  $l = 0,06$  м — расположенные независимо,  $C_{хо} = 0,78$ ,  $S_{сеч} = 0,0006$  м<sup>2</sup>,  $G_b = 2$  кгс,  $q = 450$  кгс/м<sup>2</sup>.

$$X = (C_{хд} S_{сеч} N_d + C_{хо} S_{сеч} N_o) q = 5,4 \text{ кгс.}$$

7. Фал буя — представляется в виде невесомого троса  $d = 0,01$  м, движущегося в потоке в вертикальной плоскости,  $h = 10$  м,  $G = 80$  кгс,  $C_x = 1,8$ ,  $K = 2$ ,  $q = 450$  кгс/м<sup>2</sup>.

Расчёт формы троса и гидродинамических сил производится по формулам приведённым в [1].

$$tg \alpha = K$$

$$\alpha = 63^\circ$$

$$r = C_x d q = 8,1 \text{ кгс/м}$$

$$h = \frac{G_b}{r \sin \alpha_0} \ln \frac{ctg(\alpha/2)}{ctg(\alpha_0/2)}$$

$$\alpha_0 = 36^\circ$$

$$X = \frac{G_b}{\sin \alpha_0} (\cos \alpha_0 - \cos \alpha)$$

$$T = \frac{G_b}{\sin \alpha_0}$$

На основании выполненных по этим формулам расчётов получено

$$X = 48 \text{ кгс}$$

$$T = 136 \text{ кгс}$$

8. Поддерживающий буй — представляется в виде тела обтекаемой формы, движущегося по поверхности воды, которое буксируется и заглубляется усилием со стороны фала. На основании данных по буксируемым поддерживающим буям, приведённых в [1], получено:

$$\Delta = T \sin \alpha = 121 \text{ кгс}$$

$$X = \Delta / K = 60 \text{ кгс}$$

Сводка сопротивлений элементов системы сведена в таблицу 1.

Таблица 1

**Сопротивление элементов системы**

№ п/п	Элемент	Гидродинамическое сопротивление одного элемента, кгс	Суммарное сопротивление одноимённых элементов, кгс
1	Буксировочный трос (1 шт.)	3,2	3,2
2	Жгут шлангов (1 шт.)	8,5	8,5
3	Пневмоисточник (10 шт.)	45	450
4	Скоба подвески (10 шт.)	18	180
5	Соединительная цепь (27 шт.)	7,5	203
6	Цепь подвески (20 шт.)	5,4	108
7	Фал буя (10 шт.)	48	480
8	Поддерживающий буй (10 шт.)	60	600
Всего			2033

Величина отводящей боковой силы зависит не только от гидродинамического сопротивления источников, но и от гидродинамических характеристик кабель-троса и его формы и натяжения. Поэтому для определения потребной отводящей силы необходимо определить буксировочный угол троса  $\alpha_0$  и его натяжение. Для этого решается задача о равновесии троса. Принимается допущение, что  $Z_B = Z_0$ .

Имеем:

$$T = \frac{F_{\text{сопр}}}{\cos \alpha_0};$$

$$Z_0 + Z_B = 50 \text{ м};$$

$$X_0 + X_B = 30 - 50 \text{ м}.$$

Система уравнений, описывающая положение троса в потоке воды:

$$l = \frac{T}{r} (ctg \alpha - ctg \alpha_0);$$

$$X_B = \frac{T}{r} \left( \frac{1}{\sin \alpha} - \frac{1}{\sin \alpha_0} \right);$$

$$Z_B = \frac{T}{r} \ln \frac{ctg(\alpha/2)}{ctg(\alpha_0/2)}.$$

Потребная величина отводящей силы на основании этих формул равна

$$F_{\text{отв}} = 3200 \text{ кгс.}$$

### Определение размеров гидродинамического отводителя

Принимается, что отводитель будет выполнен в виде плоской изогнутой пластины с удлинением, равным 5. На основании данных работы [1] такой отводитель имеет максимальное значение коэффициента подъёмной силы, равное 1,8. Эксплуатационное значение принято равным 1,4.

Потребная площадь отводителя при этом значении коэффициента подъёмной силы и определённой выше потребной отводящей силы равна  $S_{\text{отв}} = 5 \text{ м}^2$ .

### Предложения по уменьшению гидродинамического сопротивления системы

Полученные значения площади отводителя делают последний труднореализуемым на практике. Из расчётов нетрудно видеть, что причиной столь большой потребной площади отводителя является значительное сопротивление источников. Ниже приводятся расчёты нескольких способов уменьшения гидродинамического сопротивления элементов системы.

1. Оснащение пневмоисточника обтекателем.

$$S_{\text{сеч}} = 0,14 \text{ м}^2, q = 450 \text{ кгс/м}^2, C_x = 0,1.$$

$$X = C_x q S_{\text{сеч}}$$

$$X = 6,3 \text{ кгс}$$

2. Зачехление соединительной цепи.

$$C_f = 0,003, q = 450 \text{ кгс/м}^2, d = 0,04 \text{ м}, S_{\text{пов}} = 0,25 \text{ м}^2.$$

$$X = C_f q S_{\text{пов}}$$

$$X = 0,34 \text{ кгс}$$

3. Замена плавающего поддерживающего буя погруженным.

$$C_x = 0,1, q = 450 \text{ кгс/м}^2, S_{\text{сеч}} = 0,2 \text{ м}^2.$$

$$X = C_x q S_{\text{сеч}}$$

$$X = 9 \text{ кгс}$$

Сводка сопротивлений элементов модифицированной системы дана в таблице 2.

Таблица 2

Сопротивление элементов модифицированной системы

№ п/п	Элемент	Гидродинамическое сопротивление одного элемента, кгс	Суммарное сопротивление одноимённых элементов, кгс
1	Буксировочный трос (1 шт.)	3,2	3,2
2	Жгут шлангов (1 шт.)	8,5	8,5
3	Пневмоисточник (10 шт.)	6,3	63
4	Скоба подвески (10 шт.)	18	180
5	Соединительная цепь (27 шт.)	0,34	9,2
6	Цепь подвески (20 шт.)	5,4	108

7	Погруженный буй (10 шт.)	9	90
Всего			462

В таблице 3 указан эффект от предлагаемых изменений.

Таблица 3

**Выигрыш от уменьшения сопротивления модифицированной системы**

№ п/п	Модификация	Уменьшение сопротивления в % от исходного
1	Оснащение пневмоисточников обтекателями	19
2	Зачехление соединительных цепей	9,5
3	Замена плавающих поддерживающих буюв погруженными	49
4	Применение всех модификаций	77,5

**Определение потребной отводящей силы и размеров отводителя для модифицированной системы**

На основании формул, описывающих положение троса в потоке (см. выше), сила необходимая для отведения модифицированного пневмоисточника:

$$F_{отв} = 1720 \text{ кгс.}$$

Площадь отводителя, аналогичного описанному выше:

$$S_{отв} = 2,7 \text{ м}^2.$$

Видно, что при снижении гидродинамического сопротивления пневмоисточника в 4,3 раза потребная площадь отводителя уменьшается лишь в 1,85 раз. Причина этого в том, что при этом угол подхода буксировочного троса  $\alpha_0$  увеличивается с  $58^\circ$  до  $75^\circ$ . Увеличение угла буксировки объясняется тем, что при уменьшении сопротивления пневмоисточника сопротивление погруженной части буксировочного троса не изменяется.

Очевидно, что целесообразно выполнить буксировочный трос удобообтекаемым. В этом случае буксировочный угол  $\alpha_0$  составит  $50^\circ$ . Потребная отводящая сила:

$$F_{отв} = 550 \text{ кгс.}$$

Площадь отводителя:

$$S_{отв} = 0,87 \text{ м}^2.$$

**Заключение**

Работа с кабельными системами на борту надводных кораблей представляет собой серьезную техническую проблему для инженеров-конструкторов океанографической промышленности. Существующие подходы в значительной степени опираются на эмпирические методы, трудоемкие и дорогостоящие эксперименты. Целью поисковых работ является повышение эффективности проектирования буксируемых кабельных систем. Одним из способов эффективного моделирования динамики кабельной системы является проведение гидродинамических расчетов по вышеизложенным выше схемам.

В результате выполненных расчётов получены гидродинамические характеристики системы отведения в заданной конфигурации, которые могут быть

положены в основу конструкторской разработки сейсмических кос. Полученные расчетным путем значения геометрических параметров отводителя показали, что исходный вариант системы отведения будет трудно реализуем на практике, поэтому дополнительно были сделаны оценки вариантов улучшения системы отведения.

Дальнейшим продолжением работ может быть разработка численного алгоритма для расчета динамики подводной тросовой системы с учетом нелинейных эффектов. Представляют интерес расчеты динамики тросовых систем при произвольном законе движения верхней точки крепления троса. Результаты численного моделирования подлежат сравнению с результатами экспериментальных исследований. Таким образом, будет осуществлено тестирование вычислительных алгоритмов, а с другой стороны будет возможно выявить роль нелинейных эффектов в динамике тросовой системы.

#### Список литературы

1. Егоров В.И. Подводные буксируемые системы. Л.: Судостроение, 1981. - 304 с.
2. Гусев А.Л. О расчёте динамических характеристик движения сейсмической косы / А.Л. Гусев, Е.А. Першин // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2018. – № 56. – С. 28-36.
3. Токарев П.Н. Математическая модель произвольного движения и маневрирования судна / П.Н. Токарев // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2018. – № 56. – С. 198-214.
4. Левшонков Н.В. Определение основных проектных параметров системы стабилизации длиномерной буксируемой косы со специальными автоматическими стабилизаторами / Н.В. Левшонков, А.Л. Гусев // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – № 3-1(41). – С. 28-33.
5. Levshonkov N.V. Calculation of vibrations in a tethered underwater vehicle-umbilical cable system / N.V. Levshonkov, A.L. Gusev, A.A. Krylosova // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2020. Т. 49. № 7. С. 562-567.
6. Дмитриев А.Н. Проектирование подводных аппаратов. / А.Н. Дмитриев // Л.: Судостроение, 1978. – 238 с.
7. Озеров М.В. Дрейфующая система сбора океанографических данных переменного глубинного профиля / М.В. Озеров // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. № S1. С. 235-241.
8. Веселов В.А. Метод выявления дефектов морских трубопроводов посредством вейвлет-анализа сигнала дистанционной магнитометрии / В.А. Веселов, В.В. Проботюк, М.В. Китаев, О.Э. Суков // Научные проблемы водного транспорта. 2020. № 65. С. 133-142.
9. Грамузов Е.М. Комплексное исследование пространственных колебаний плавучих объектов и параметров их стабилизации в опытовом бассейне / Е.М. Грамузов, О.А. Иванова // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2018. № 55. С. 21-33.
10. Кудрявцев С.А. Оценка сейсмического воздействия сейсмических сил на линейные объекты теплоснабжения / С.А. Кудрявцев, Д.Ю. Малеев, В.А. Шабалин, В.Н. Стефанюк, А.А. Гуменюк // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2018. № 4 (17). С. 31-35.
11. Сенин Л.Н. Инструментальные данные малоглубинной сейсморазведки в расчетах сейсмических жесткостей при сейсмическом микрорайонировании / Л.Н. Сенин, Т.Е. Сенина // Уральский геофизический вестник. 2020. № 4 (42). С. 29-35.
12. Бобров И.А. Использование сейсмического мониторинга при разработке морских месторождений нефти и газа / И.А. Бобров, И.И. Катков // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. 2021. Т. 2. С. 193-195.

#### References

1. Egorov V.I. Podvodnyye buksiruyemyye sistemy. L.: Sudostroyeniye, 1981. - 304 s.

2. Gusev, A.L. O raschete dinamicheskikh kharakteristik dvizheniya seysmicheskoy kosy / A.L. Gusev, YE.A. Pershin // Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta. – 2018. – № 56. – S. 28-36.
3. Tokarev, P.N. Matematicheskaya model proizvolnogo dvizheniya i manevrirovaniya sudna / P.N. Tokarev // Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta. – 2018. – № 56. – S. 198-214.
4. Levshonkov, N.V. Opredeleniye osnovnykh proyektnykh parametrov sistemy stabilizatsii dlinnomernoy buksiruyemoy kosy so spetsialnymi avtomaticheskimi stabilizatorami / N.V. Levshonkov, A.L. Gusev // Morskiye intellektualnyye tekhnologii. – 2018. – № 3-1(41). – S. 28-33.
5. Levshonkov N.V. Calculation of vibrations in a tethered underwater vehicle-umbilical cable system / N.V. Levshonkov, A.L. Gusev, A.A. Krylova // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2020. T. 49. № 7. C. 562-567.
6. Dmitriyev A.N. Proyektirovaniye podvodnykh apparatov. / A.N. Dmitriyev // L.: Sudostroyeniye, 1978. – 238 s.
7. Ozerov M.V. Dreyfuyuschaya sistema sbora okeanograficheskikh dannykh peremennogo glubinnogo profilya / M.V. Ozerov // Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra. 2018. № S1. S. 235-241.
8. Veselov V.A. Metod vyyavleniya defektov morskikh truboprovodov posredstvom veyvlet-analiza signala distantsionnoy magnitometrii / V.A. Veselov, V.V. Probotyuk, M.V. Kitayev, O.E. Surov // Nauchnyye problemy vodnogo transporta. 2020. № 65. S. 133-142.
9. Gramuzov E.M. Kompleksnoye issledovaniye prostranstvennykh kolebaniy plavuchikh obyektov i parametrov ikh stabilizatsii v opytovom bassejne / YE.M. Gramuzov, O.A. Ivanova // Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta. 2018. № 55. S. 21-33.
10. Kudryavtsev S.A. Otsenka seysmicheskogo vozdeystviya seysmicheskikh sil na lineynyye obyekt y teplosnabzheniya / S.A. Kudryavtsev, D.YU. Maleyev, V.A. Shabalin, V.N. Stefanyuk, A.A. Gumenyuk // Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona. 2018. № 4 (17). S. 31-35.
11. Senin L.N. Instrumentalnyye dannye maloglubinnoy seysmorazvedki v raschetakh seysmicheskikh zhestkostey pri seysmicheskoy mikrorayonirovaniy / L.N. Senin, T.E. Senina // Uralskiy geofizicheskiy vestnik. 2020. № 4 (42). S. 29-35.
12. Bobrov I.A. Ispolzovaniye seysmicheskogo monitoringa pri razrabotke morskikh mestorozhdeniy nefi i gaza / I.A. Bobrov, I.I. Katkov // Problemy razrabotki mestorozhdeniy uglevodorodnykh i rudnykh poleznykh iskopayemykh. 2021. T. 2. S. 193-195.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Александр Леонидович Гусев**, старший преподаватель, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, 420111, г. Казань, ул. К.Маркса, 10, e-mail: algusev@kai.ru

**Alexander L. Gusev**, Senior Lecturer, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, 420111, Kazan, K. Marksa st., 10, e-mail: algusev@kai.ru

**Евгений Александрович Першин**, к.т.н., доцент, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, 420111, г. Казань, ул. К.Маркса, 10, e-mail: eapershin@kai.ru

**Evgeny A. Pershin**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, 420111, Kazan, K. Marksa st., 10, e-mail: eapershin@kai.ru

Статья поступила в редакцию 03.04.2023; опубликована онлайн 20.06.2023.  
Received 03.04.2023; published online 20.06.2023.

УДК 629.122

DOI: 10.37890/jwt.vi75.365

## **Методика автоматизированного формирования судовой поверхности буксирного судна**

**С.В. Давыдова**

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1310-6157>*

**К.П. Мочалов**

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

**Аннотация.** В работе предложена методика автоматизированного построения поверхности буксирного судна. Указаны особенности подготовки исходных данных для формирования ординат теоретического чертежа. Рассмотрены особенности формирования поверхности буксирного судна. Выявлены основные проблемы формирования их поверхности, связанные с наличием тоннельных обводов, транца и слома шпангоутов. Описан инструментарий программы применительно к редактированию положения точек теоретического чертежа, линий шпангоутов и поверхности судна в целом. Разработан процесс построения шпангоутов с изломом. Проведён расчёт гидростатики и элементов теоретического чертежа для разработанной модели судовой поверхности. Проведена оценка возможности экспортирования разработанной поверхности в другие программы для дальнейшего проектирования судна.

**Ключевые слова:** судостроение, буксирное судно, ординаты теоретического чертежа, построение теоретического чертежа, ординаты поверхности, построение поверхности, оболочка, сетка, управляющие точки, угловые и управляющие ребра, построение излома шпангоутов, расчёт гидростатики, расчёт элементов чертежа.

## **The method of automated formation of the ship surface of a tugboat**

**Svetlana V. Davydova**

**Konstantin P. Mochalov**

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

**Abstract.** The paper proposes a technique for automated construction of the surface of a tugboat. The features of the preparation of initial data for the formation of the ordinates of the theoretical drawing are indicated. The features of the formation of the surface of the tugboat are considered. The main problems of formation of their surface associated with the presence of tunnel lines, transom and broken frames are identified. The program tools are described in relation to editing the position of points of a theoretical drawing, lines of frames and the surface of the vessel as a whole. A process for constructing frames with a kink has been developed. The calculation of hydrostatics and elements of the theoretical drawing for the developed model of the ship's surface was carried out. An assessment was made of the possibility of exporting the developed surface to other programs for further ship design.

**Keywords:** shipbuilding, tugboat, ordinates of a theoretical drawing, construction of a theoretical drawing, ordinates of a surface, construction of a surface, shell, mesh, control points, corner and control edges, construction of a break in frames, calculation of hydrostatics, calculation of drawing elements.

### **Введение**

Большинство существующих процедур формирования судовой поверхности связано с получением обводов грузовых судов, имеющих традиционные обводы. Форма корпуса буксира обладает значительно более сложными обводами, чем грузовое судно. В связи с этим разработка модели судовой поверхности буксирного судна требует особенного подхода.

Создание системы для автоматизированного проектирования теоретического чертежа (далее САПР ТЧ), имеющего изломы, сложно выполнимо [1], поэтому в большинстве САПР ТЧ имеется инструментарий для редактирования поверхности ТЧ [2]. То есть ТЧ с обводами, имеющими излом (ТЧ буксира или толкача) получают редактированием ТЧ с плавными обводами (ТЧ транспортного судна). Такой же принцип возможно использовать в программе «FreeShip». Программа позволяет моделировать судовую поверхность, используя возможности ее разбиения на отдельные участки, что позволяет формировать поверхность максимально точно, в соответствии с требованиями проектировщика. Кроме моделирования корпуса программа позволяет выполнять расчеты основных элементов теоретического чертежа судна и расчеты по гидродинамике, что очень важно при разработке судовой поверхности и позволяет оперативно оценить качество ее разработки. Программа предназначена для работы в Windows, имеет удобный интерфейс, что делает ее максимально доступной широкому кругу пользователей.

На рисунке приведен теоретический чертеж буксирного судна. Сложность реализации его судовой поверхности заключается в формировании кормовой части корпуса, имеющего туннельные обводы, и шпангоутов с изломом (рис. 1). Несмотря на разнообразие возможностей программных средств, в настоящее время не существует систематизированного подхода по разработке судовой поверхности буксирного судна. Используя существующий инструментарий, разработаем методику формирования его поверхности, которая бы позволила сократить сроки разработки и повысить его качество.

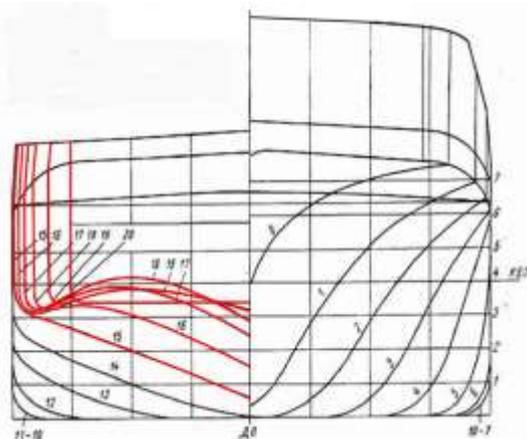


Рис. 1. Шпангоуты теоретического чертежа буксира (пр. 749)

Исходными данными для формирования поверхности являются: главные размерения судна, ординаты теоретического чертежа и аппликаты ватерлиний (рис. 2).

При создании нового корпуса проектировщик может ориентироваться на уже построенные суда, то есть использовать суда-прототипы, подобные по форме корпуса проектируемому судну. В нашем случае будем ориентироваться на полученные ранее координаты ТЧ (рис. 2) [3] и ТЧ буксира пр.749 (рис. 1).

Исходные данные		Ординаты шпангоутов									
Длина, м	40,0	№ шп	Номера ватерлиний								
Ширина, м	10,0		0	1	2	3	4	5	6	7	
Высота борта, м	3,0		0	-	-	-	0	0,111	0,341	0,924	
Осадка, м	2,0		1	-	0	0,498	0,718	0,960	1,255	1,594	2,433
Кэф. общ. полноты	0,6		2	0	0,938	1,370	1,676	1,982	2,331	2,750	3,651
Абсцисса ЦВ, м	0		3	0	1,756	2,226	2,614	2,945	3,320	3,686	4,438
Апplikаты ватерлиний		4	0	2,590	3,082	3,455	3,719	4,043	4,317	4,866	
№ ватерлинии	Апplikата	5	0	3,384	3,826	4,086	4,312	4,490	4,689	5,000	
0	0	6	0	3,942	4,355	4,590	4,746	4,835	4,956	5,000	
1	0,50	7	0	4,350	4,660	4,847	4,912	4,989	5,000	5,000	
2	1,00	8	0	4,606	4,803	4,967	5,000	5,000	5,000	5,000	
3	1,50	9	0	4,655	4,869	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	
4	2,00	10	0	4,704	4,934	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	
5	2,25	11	0	4,702	4,934	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	
6	2,50	12	0	4,697	4,934	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	
7	3,00	13	0	4,650	4,930	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	
		14	0	4,224	4,917	4,999	5,000	5,000	5,000	5,000	
		15	0	1,959	4,749	4,991	4,997	4,998	4,999	4,999	
		16	-	0	1,127	4,847	4,903	4,939	4,978	4,992	
		17	-	-	0	0,885	-	-	-	-	
			-	-	-	3,207	-	-	-	-	
			-	-	-	4,655	4,773	4,812	4,880	4,958	
		18	-	-	-	0	1,148	-	-	-	
			-	-	-	-	2,621	-	-	-	
			-	-	-	-	4,433	4,588	4,633	4,668	
		19	-	-	-	0	0,879	-	-	-	
			-	-	-	-	2,869	-	-	-	
			-	-	-	-	4,018	4,134	4,273	4,308	
		20	-	-	-	0	2,089	2,622	2,931	3,330	

Рис. 2. Исходные данные буксира и ординаты его ТЧ из программы «Ткорпус»

На рисунке 3 показан ТЧ, основа которого выполнена на основании координат, представленных на рисунке 2. Для создания оболочки необходимо задавать одинаковое количество ординат для каждого шпангоута. Поэтому необходимо определить шпангоут с наибольшим числом ординат и дополнить координаты для остальных шпангоутов (рис. 3) [4].

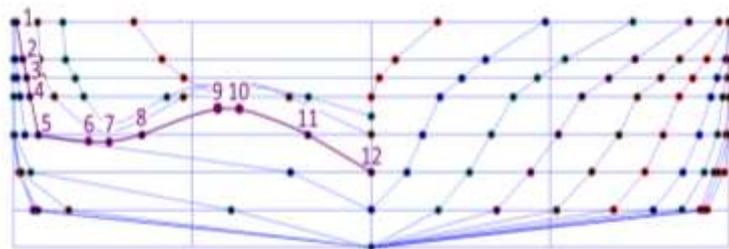


Рис. 3. Графический ТЧ

### Построение исходной оболочки корпуса

Опишем дальнейший процесс формирования поверхности. В диалоговом окне (рис.4) вводятся исходные данные модели.

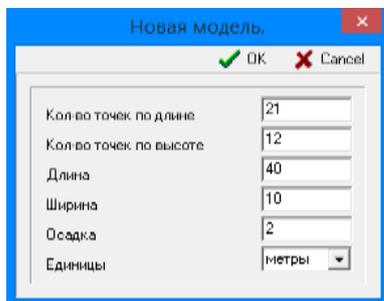


Рис. 4. Ввод исходных данных

Выбираются единицы измерения (метры, футы) и заносятся исходные данные судна: длина, ширина, осадка, указывается количество точек (ординат) отдельно по длине и отдельно по высоте, определяющих структуру оболочки поверхности по всей длине судна.

Количество точек по высоте определяет разбивку сетки оболочки от диаметрального батокса до линии палубы (рис. 5).

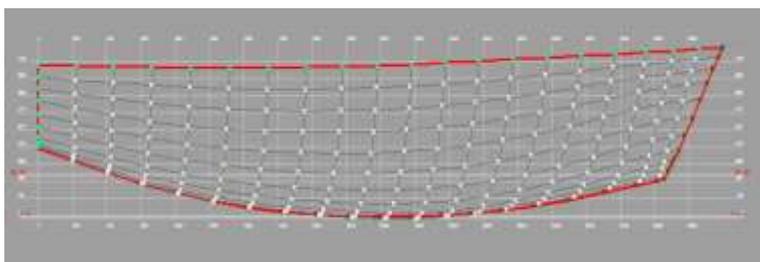


Рис. 5. Количество точек по высоте судна

Сетка координат строится автоматически в зависимости от габаритов созданной оболочки и её нельзя изменить после создания оболочки. Также к сетке нельзя привязать точки оболочки, поэтому сетка координат используется только для визуального контроля положения точек оболочки.

Ориентируясь на данные рисунка 2, зададим необходимое количество точек по длине и по высоте. После ввода исходных данных в автоматическом режиме построится оболочка корпуса (рис. 6).

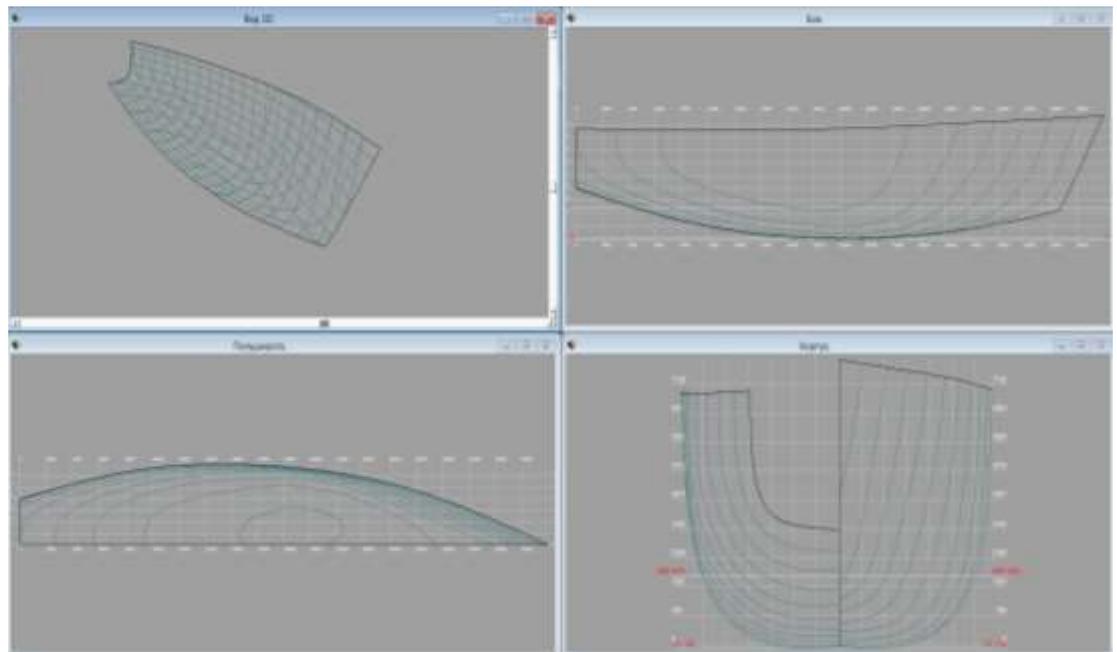


Рис. 6. Проекция и «3D» вид построенной оболочки

#### **Свойства оболочки**

Основа оболочки состоит из точек, количество которых определяется проектировщиком при создании оболочки (рис. 4). Точки соединены между собой рёбрами, которые формируют грани оболочки [5]. В программе используются два типа рёбер: угловые и управляющие (см. рис. 7). Угловые рёбра красного цвета и обозначают границу оболочки, примеры угловых рёбер – линии контура верхней палубы, линия контура в диаметральной плоскости (далее ДП), линия контура транца в корме. Оболочка проходит строго через угловые рёбра. Управляющие рёбра серого цвета и обозначают линию между двумя смежными гранями. Управляющее ребро плавно соединяет две смежные грани между собой. Все рёбра оболочки, кроме угловых, являются управляющими. Оболочка не проходит строго через управляющее ребро, а проходит близко к ним. Рёбра не могут пересекаться с другими рёбрами.

Точки также делятся на угловые и управляющие. Управляющие точки белого цвета через них проходят только управляющие рёбра.

Через угловые точки проходят только угловые ребра, и эти точки имеют несколько цветов: салатный – точка формирует границу оболочки и соединена с другой точкой угловым ребром; синий – точка расположена на ДП и не соединена ребром с другой точкой на ДП (крайняя носовая точка и крайняя кормовая точка); коричневый – точка соединена с другой точкой угловым ребром, то есть точка через которую проходит угловое ребро.

Любое ребро, кроме граничного (проходит через салатные точки), можно сделать как угловым, так и управляющим эта особенность позволяет построить линию слома шпангоута (переход шпангоута из криволинейного в прямой) при проектировании корпуса буксира.

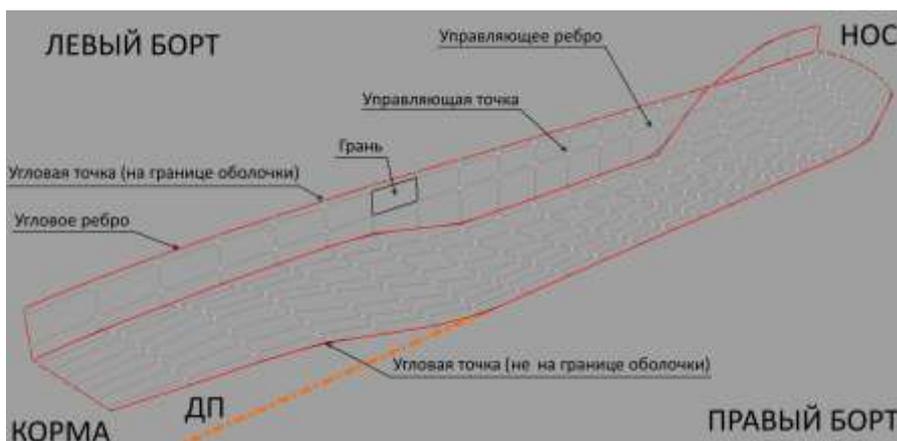


Рис. 7. Типы точек и рёбер

### Редактирование оболочки корпуса

В результате автоматического построения получена универсальная оболочка с плавными шпангоутами без туннельных обводов и с транцем в корме, с произвольной высотой борта и водоизмещением. Полученный базовый вариант необходимо далее корректировать. Корректировка начинается с исправления высоты борта, в программе это выполняется с помощью масштабирования по осям. Процедура выполняется в диалоговом окне (рис. 8).

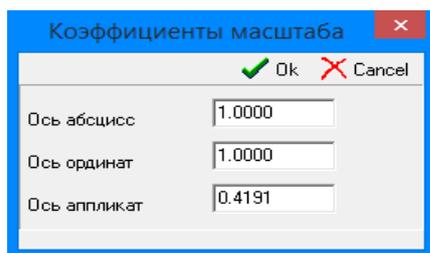


Рис. 8. Масштабирование оболочки

Используя возможности стандартной процедуры масштабирования, получаем высоту борта равной 3 м и осадку 0,785 м. Значение осадки не влияет на форму оболочки. Оно используется для расчётов статики и масштаба Бонжана, выполняемые программой автоматически и изменяется проектировщиком в установках проекта (рис. 9).

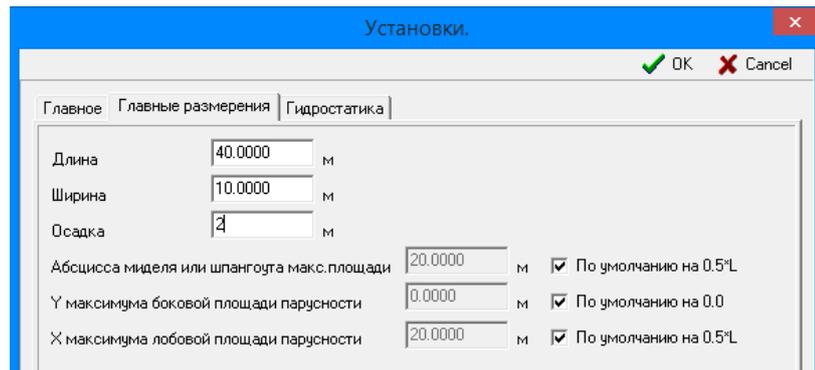


Рис. 9. Главные размеры оболочки

Присвоим ординаты ТЧ каждой точке поверхности. Пример редактирования 20-го шпангоута рассмотрим на рисунке 10. Редактирование начинается с крайних точек в диаметральной плоскости (далее ДП) и точек палубы, затем редактируются остальные точки шпангоута таким образом, чтобы шпангоут получился сглаженным.

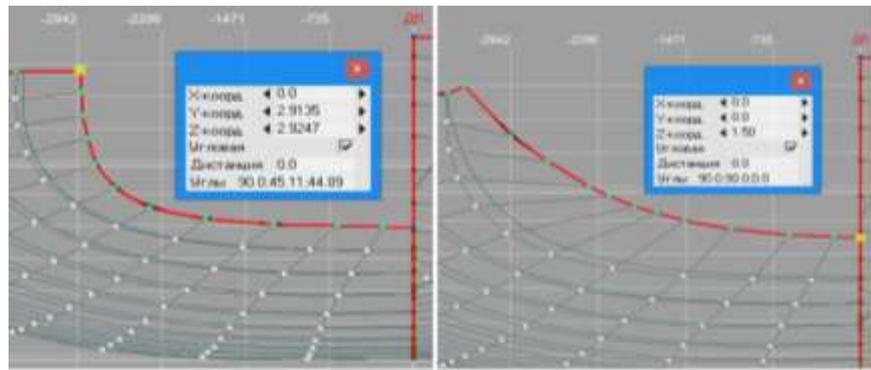


Рис. 10. Шпангоут (слева до изменений справа после изменений)

Несмотря на то, что количество точек оболочки по длине и равно числу теоретических шпангоутов – 21, точки не расположены по шпангоутам на координатной сетке, поэтому необходимо отредактировать положение точек оболочки по длине судна, чтобы они соответствовали заданным координатам (рис. 11).

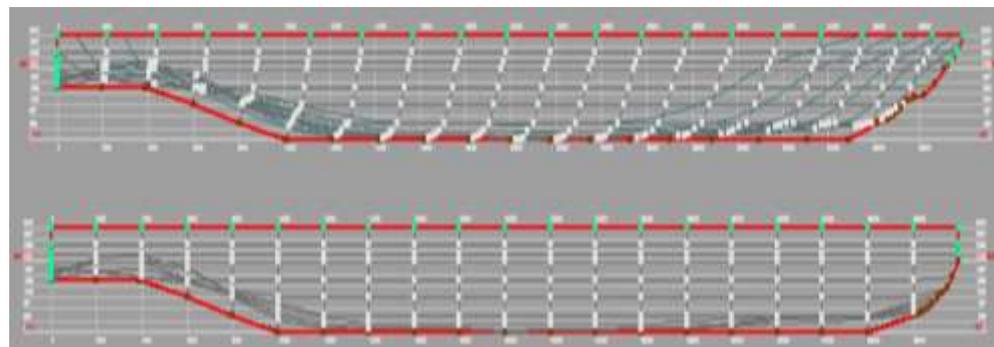


Рис. 11. Проекция «Бок» (сверху до изменений, снизу после изменений)

После систематизация расположения точек оболочка примет вид доступный для дальнейшего редактирования (рис. 12).

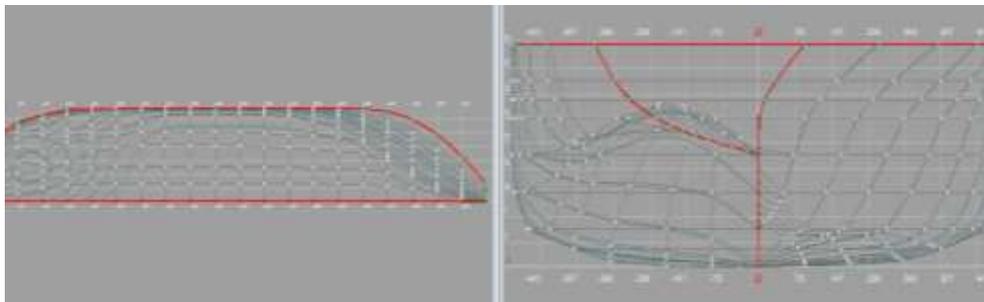


Рис. 12. Оболочка, построенная по координатам ГЧ

### **Построение излома шпангоутов**

Как отмечалось ранее, характерным отличием корпуса буксиров, кроме тоннельных обводов, также является излом шпангоутов. Форма корпуса оболочки, построенной по координатам (рис. 12) не полностью отражает специфические особенности судовой буксирного судна (рис.1). Кроме этого не учтён вид носовой оконечности, форма и размеры транца, форма кормовых шпангоутов. Процедуры дальнейшей корректировки формы носовой оконечности и транца представлены на рисунке 13.

Текущая оболочка по форме корпуса приближена к требуемым параметрам поверхности буксира [6]. На рисунке 14 более детально рассмотрена форма кормовых шпангоутов, которые имеют сглаженный переход от борта к днищу, что не соответствует заданным характеристикам формы корпуса [7]. Форма шпангоутов плавная, лекальная. Переход от борта к днищу образован линиями разной кривизны. Отсутствуют сломы. Так как получить необходимые параметры в автоматическом режиме невозможно, то необходима дальнейшая ручная корректировка. Далее рассмотрим предлагаемую методику корректировки кормовых шпангоутов для формирования линии слома.

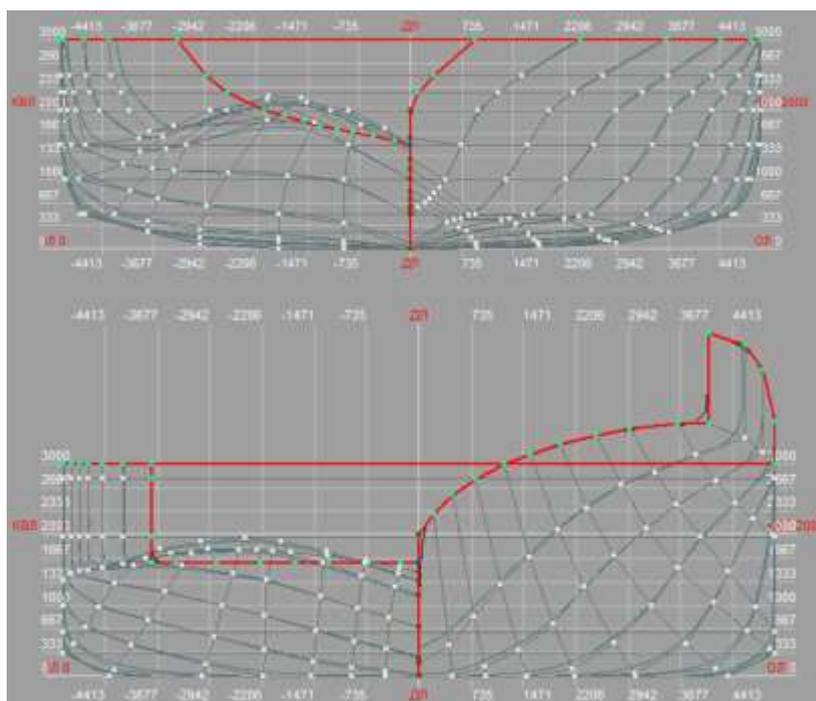


Рис. 13. Редактирование оболочки (сверху до изменений. снизу после изменений)

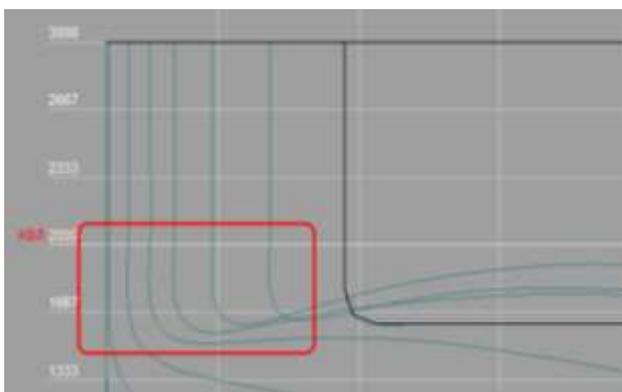


Рис. 14. Кормовые шпангоуты

Чтобы убрать кривизну, необходимо построить линию излома шпангоута. Построение излома проходит следующим образом:

1. на проекции «Корпус» выделяем шпангоут и выделяем точку, где будет проходить излом (рис. 15);
2. определяем ватерлинию, на которой расположена выделенная точка и выделяем всю эту ватерлинию;

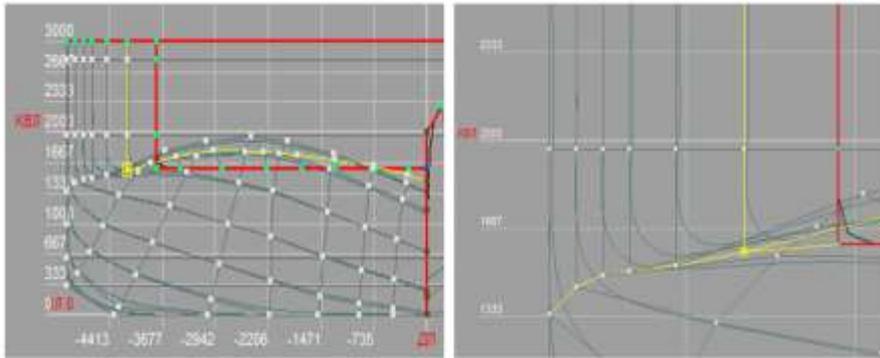


Рис. 15. Построение линии слома

3. повторно выделяем шпангоут и точку, чтобы убрать их из выделенного (рис. 16);
4. в инструментарии для работы с рёбрами выбираем пункт «Линии слома».

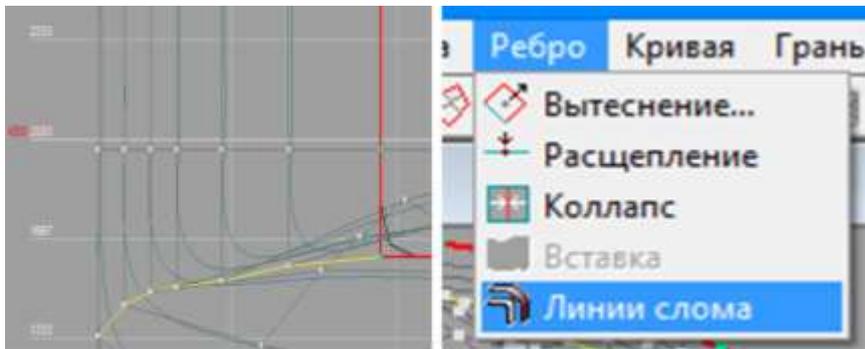


Рис. 16. Построение линии слома

Линия слома окрасится в красный цвет, как линия палубы и линия в ДП (рис. 17). Таким образом выстроилась новая граница оболочки, а у кормовых шпангоутов избавились от кривизны в районе изгиба.

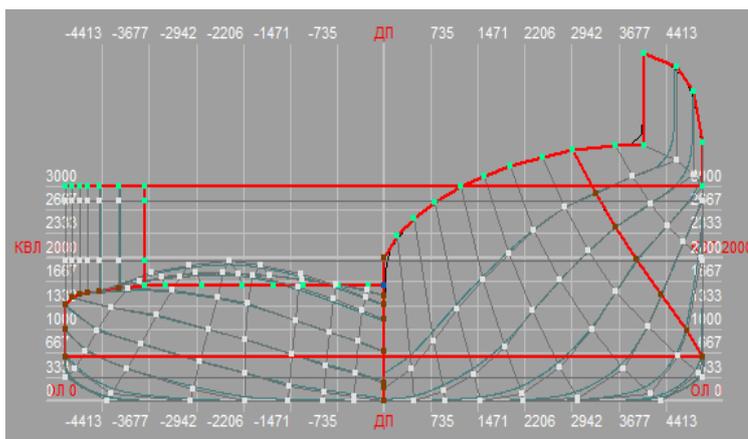


Рис. 17. Оболочка с линией слома в корме.

Построенная линия слома в носовой части буксира так же должна соответствовать архитектурно конструктивному типу судна [8] (рис.1).

Для выполнения излома необходимой формы изменим положение линии излома в носовой части в следующей последовательности.

Выполним построение новых рёбер, через которые будет проходить новая линия слома:

1. выделяем точки, между которыми нужно добавить рёбра (рис. 18);
2. в инструментарии для работы с рёбрами выбираем пункт «Вставка», позволяющий формировать новые ребра. Результат построения отображен на рисунке 18. Между выделенными точками сформировались новые рёбра;

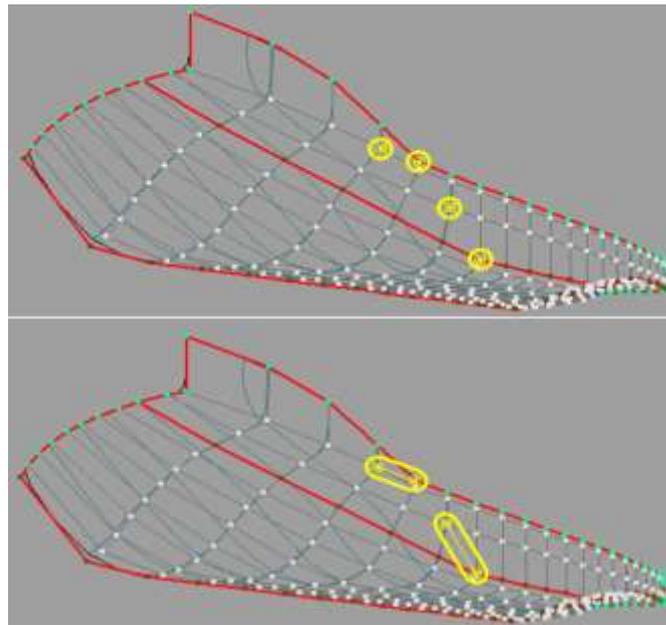


Рис. 18. Выделение точек и формирование новых рёбер

3. рёбра могут проходить только через точки (ординаты) и не могут пересекаться между собой, поэтому добавим новую точку на выделенном ребре (рис. 19) и в инструментарии для работы с рёбрами выбираем пункт «Расщепление», на ребре появится новая точка;

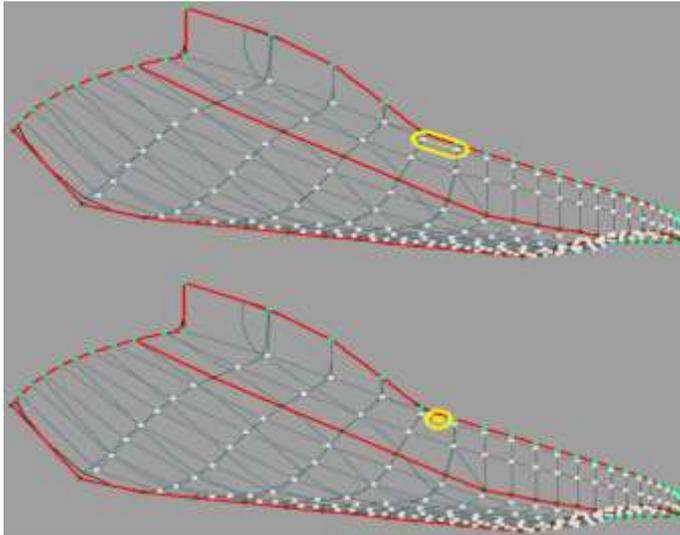


Рис. 19. Добавление новой точки

4. добавляем новые рёбра между новой точкой (рис. 20);

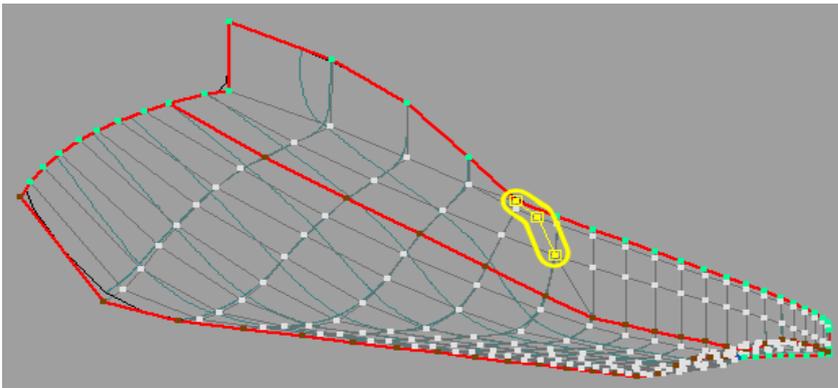


Рис. 20. Добавление новых рёбер

5. выделяем все новые рёбра и носовую часть линии слома (рис. 21) и в инструментарии для работы с рёбрами выбираем пункт «Линии слома».

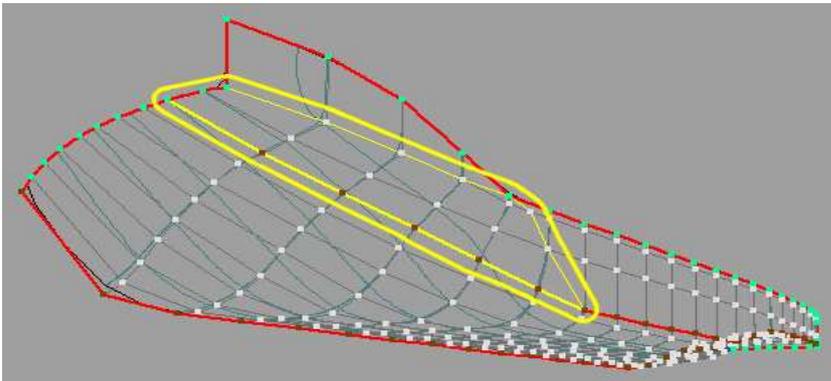


Рис. 21. Изменение носовой линии слома

Окончательная оболочка буксира приведена на рисунке 22.

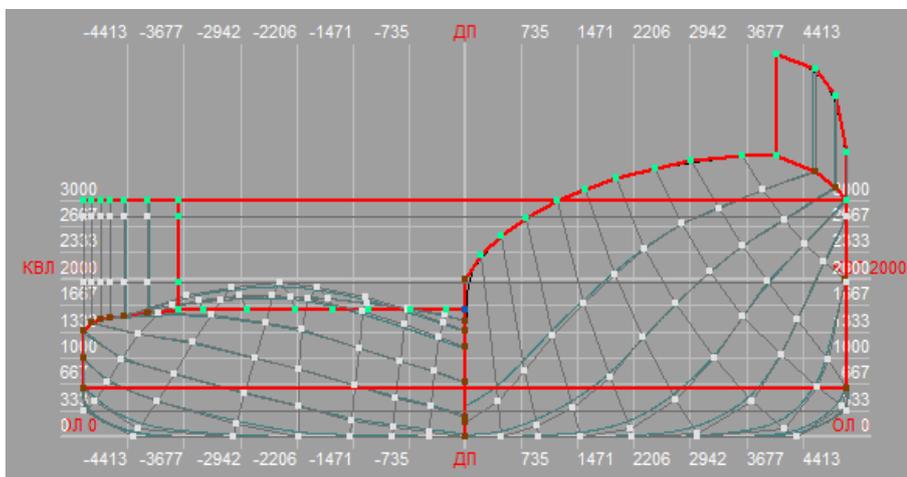


Рис. 22. Оболочка буксира

### Заключение

Полученные результаты можно использовать для проведения расчётов гидростатики, элементов ТЧ (рис. 23) по заданному проектировщиком диапазону осадок и масштаба Бонжана.

Lwl : Длина по ватерлинии  
 Bwl : Ширина по ватерлинии  
 Volume : Объёмное возмещение  
 Dlard : Водоизмещение  
 LCB : Абсцисса Ц.В., измерено от кормового перпендикуляра при X=0,0  
 VCB : Абсцисса Ц.В., измерено от точки корпуса X=0  
 Cb : Коэффициент общей полноты  
 Am : Площадь миделя  
 Cm : Коэффициент полноты миделя  
 Aw : Площадь ватерлинии  
 Cw : Коэффициент полноты ВЛ  
 LCF : Абсцисса Ц.Т., площади ватерлинии  
 Cp : Призматический коэффициент  
 S : Средняя площадь поверхности  
 ZM : Абсцисса поперечного метacentра  
 ZMI : Абсцисса продольного метacentра

Draft	Trim	Lwl	Bwl	Volume	Dlard	LCB	VCB	Cb	Am	Cm	Aw	Cw	LCF	Cp	S	ZM	ZMI
м	м	м	м	м³	тонн	м	м	[-]	м²	[-]	м²	[-]	м	[-]	м²	м	м
0.500	0.000	26.328	10.000	94.146	36.480	23.370	4.260	0.6421	4.730	0.9477	210.95	0.7473	23.687	0.6770	226.80	16.934	16.440
1.000	0.000	32.356	10.000	212.13	217.43	23.030	0.538	0.6056	9.740	0.8748	251.62	0.7777	22.427	0.6731	279.85	8.004	69.350
1.500	0.000	37.977	10.000	346.14	354.80	22.621	0.516	0.6076	14.740	0.8827	287.71	0.7576	21.359	0.6184	340.83	6.842	62.712
2.000	0.000	40.000	10.000	516.02	522.77	21.651	1.119	0.6375	19.740	0.9878	353.18	0.8029	18.818	0.6459	444.66	6.217	77.319
2.500	0.000	40.000	10.000	686.68	705.90	20.977	1.413	0.6687	24.740	0.9096	362.00	0.9065	18.267	0.6959	493.30	5.340	61.880
3.000	0.000	40.000	10.000	872.58	894.37	20.675	1.695	0.7271	29.739	0.9913	373.99	0.9350	19.798	0.7335	544.41	4.969	53.332
3.000	0.000	40.000	10.000	872.58	894.37	20.675	1.695	0.7271	29.739	0.9913	373.99	0.9350	19.798	0.7335	544.41	4.969	53.332

Рис. 23. Расчёты элементов ТЧ

Так же программа позволяет на основании сформированной оболочки получить теоретический чертеж (рис. 24). Все кривые теоретического чертежа, а именно: шпангоуты, ватерлинии, батоксы и линии слома могут экспортироваться в AutoCAD в виде трехмерных ломаных. Ординаты ТЧ в заданной системе координат экспортируется в текстовом виде в другие программы для разработки проекта на следующих этапах проектирования судна.

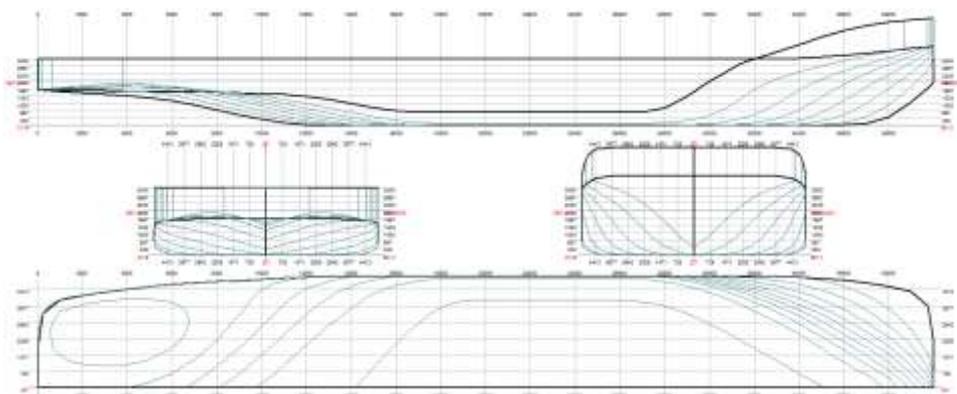


Рис. 24. ТЧ оболочки

#### Список литературы

1. Cliff W. Estes (BaseLine Technology) [Rhinoceros Advanced Training Series] Marine Design.
2. Kagan V. F. [Fundamentals of the theory of surfaces in tensor presentation]. 2013. – 518 p.
3. Давыдова С. В., Андриянов И. В. Анализ расчетов при создании теоретического чертежа буксира интерполяционным методом / Научные проблемы водного транспорта. 2021. №67. С. 24–32. DOI: 10.37890/jwt.vi67.191.
4. Давыдова С. В., Андриянов И. В. Принципы систематизации судовой поверхности буксирных судов при разработке теоретического чертежа интерполяционным методом / Научные проблемы водного транспорта. 2020. №63. с. 55–61. DOI: 10.37890/jwt.vi63.76
5. [FREE!ship PLUS manual]. The Free Software Foundation, Inc., 2008, 59 p. (In Russ.).
6. Нгуен, Зуй Бак. Архитектурно-конструктивные типы портового буксирного флота Вьетнама, Молодой ученый, 2010, № 1-2, с. 103-108. URL: <https://moluch.ru/archive/13/1010/> (дата обращения: 19.12.2022)
7. Богданов Б.В. Буксирные суда: проектирование и конструкция/ Б.В. Богданов, А.В. Слуцкий, М.Г. Шмаков, К.А. Васильев, Д.Х. Соркин – Л.: «Судостроение», 1974. – 280 с.
8. Бронников А.В. Проектирование судов : учебник / А.В. Бронников. – Л. : Судостроение, 1991. – 320 с.

#### References

1. Cliff W. Estes (BaseLine Technology) [Rhinoceros Advanced Training Series] Marine Design.
2. Kagan V. F. [Fundamentals of the theory of surfaces in tensor presentation]. 2013. – 518 p.
3. Davydova S. V., Andriyanov I. V. Analiz raschetov pri sozdanii teoreticheskogo chertezha buksira interpolyatsionnym metodom [Analysis of calculations when creating a theoretical drawing of a tugboat by interpolation method], Nauchnye problemy vodnogo transporta [Nauchnye problemy vodnogo transporta]. 2021. No. 67, pp. 24–32. DOI: 10.37890/jwt.vi67.191.
4. Davydova S. V., Andriyanov I. V. Printsipy sistematzatsii sudovoi poverkhnosti buksirnykh sudov pri razrabotke teoreticheskogo chertezha interpolyatsionnym metodom [Principles of systematization of the ship surface of tugboats in the development of a theoretical drawing by the interpolation method] / Nauchnye problemy vodnogo transporta [Nauchnye problemy vodnogo transporta]. 2020. №63. pp. 55–61. DOI: 10.37890/jwt.vi63.76
5. [FREE!ship PLUS manual]. The Free Software Foundation, Inc., 2008, 59 p. (In Russ.).
6. Nguen, Zui Bak. Arkhitekturno-konstruktivnye tipy portovogo buksirnogo flota V'etnama [Architectural and structural types of the port tugboat fleet of Vietnam], Molodoi uchenyi [Young scientist], 2010, no. 1-2, pp. 103-108. Available at: <https://moluch.ru/archive/13/1010/> (accessed: 19.12.2022).

7. Bogdanov B.V. Buksimye suda: proektirovanie i konstruktsiya [Tugboats: design and construction] / B.V. Bogdanov, A.V. Slutskii, M.G. Shmakov, K.A. Vasil'ev, D.KH. Sorkin – L: Sudostroenie, 1974. – 280 p.
8. Bronnikov A.V. Proektirovanie sudov [Ship design] / A.V. Bronnikov. – L. : Sudostroenie, 1991. – 320 p.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Давыдова Светлана Викторовна**, к.т.н., доцент, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kaf\_ptps@vsuwt.ru

**Мочалов Константин Павлович**, магистрант кафедры «Проектирования и технологии постройки судов», Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kaf\_ptps@vsuwt.ru

**Svetlana V. Davydova**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterova street, Nizhny Novgorod, Russia, 603950, e-mail: kaf\_ptps@vsuwt.ru

**Konstantin P. Mochalov**, student of the Department of «Design and shipbuilding technology», Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951, e-mail: kaf\_ptps@vsuwt.ru

Статья поступила в редакцию 13.02.2023; опубликована онлайн 20.06.2023.  
Received 13.02.2023; published online 20.06.2023.

УДК: 629.563.21, 622.24.085.5, 622.242.4, 629.5.021.1, 629.5.011  
DOI: 10.37890/jwt.vi75.371

## **Обзор классификации полупогружных плавучих буровых установок по поколениям**

**С.А. Казьмин<sup>1</sup>**

**А.В. Лобанов<sup>2</sup>**

**С.В. Вербицкий<sup>3</sup>**

<sup>1,3</sup> ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ПАО «Газпром», Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация:** В статье описывается многообразие взглядов специалистов судостроительной и нефтегазовой отраслей, страховых брокеров, аналитических агентств, сотрудников профильных ведомств и классификационных обществ, а также буровых подрядчиков на классификацию полупогружных буровых установок, и сводится к единой системе данных разнообразие мнений относительно поколений техники и технологий, зависящих не только от глубины эксплуатации, бурения, нагрузки на крюке и года постройки, но и от других немаловажных факторов, таких как: наличие тележек для бурильных труб, активного компенсатора кронблока (компенсатора вертикальных перемещений бурильных труб), численности персонала, количества превенторов и буровых насосов, запасов топлива и технических масел на борту. При этом учитывается привычная классификация установок исходя из их функциональных возможностей, архитектурно-конструктивного типа, района эксплуатации и гидрометеорологических условий. Помимо того, в работе выполнен укрупненный анализ мирового рынка компаний отрасли, осуществляющих деятельность в области оказания услуг по морскому бурению. Авторами статьи, исходя из состава численности бурового флота компании-лидера отрасли и характеристик средств океанотехники предлагается актуальный взгляд на классификацию по поколениям.

**Ключевые слова:** полупогружная буровая установка, океанотехника, классификация, судно, морское бурение, классификационное общество.

## **Overview of the classification of mobile offshore semi-submersible drilling units by generations**

**Sergey A. Kazmin<sup>1</sup>**

**Aleksey V. Lobanov<sup>2</sup>**

**Sergey V. Verbitskiy<sup>3</sup>**

<sup>1,3</sup> St. Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup> PJSC Gazprom, Saint Petersburg, Russia

**Abstract:** The article describes the diversity of views of specialists in the shipbuilding and oil and gas industries, insurance brokers, analytical agencies, employees of specialized departments and classification societies, as well as drilling contractors and employees of operating companies on the classification of mobile offshore semi-submersible drilling units, and is reduced to a unified systematization of these opinions on generations of technologies that depend not only on the depth of operation, drilling, hook load and year of construction, but also on other important factors, such as: the presence of drill pipes trolleys, an active crown block compensator (drill pipe vertical movement compensator), the number of personnel, the number of preventers and drilling pumps, the volume of fuel and technical oils on board. This takes into account the usual classification of installations based on their functionality, architectural and structural type, operating area and hydrometeorological conditions. In addition, an integrated analysis of the global market of companies in the

industry operating in the field of offshore drilling services is carried out in the work. The authors of the article, based on the composition of the drilling fleet of the industry leader and the characteristics of ocean technology equipment, offer an up-to-date view of the classification by generations.

**Keywords:** mobile offshore semi-submersible drilling units, ocean engineering, classification, ship, offshore drilling, classification society.

### **Предмет исследования**

Полупогружная плавучая буровая установка (ППБУ) – плавучее техническое средство (ПТС) со стабилизирующими колоннами, находящаяся в рабочем состоянии на плаву и удерживаемая в горизонтальной плоскости с помощью якорей, подруливающих устройств или других средств позиционирования. Имеет три различных режима эксплуатации: рабочее, транспортировки и выживания [1].

Несколько водоизмещающих понтонов, опорных башмаков (в большинстве случаев – два, погруженных полностью или частично в воду (Рис. 1)), соединенных горизонтальными связями (раскосами), которые погружаются ниже ватерлинии, чтобы оставаться на плаву при различных заданных эксплуатационных нагрузках. В состав верхнего строения ППБУ входят:

- буровая вышка;
- факельная стрела;
- палубный кран;
- буровое оборудование;
- хранилище секций райзеров;
- жилой комплекс с вертолетной площадкой и другими производственными и жилыми помещениями, различным технологическим оборудованием и необходимыми запасами.

Верхняя объемная палуба опирается на ряд стабилизирующих (опорных) колонн, которые соединяют корпус с погруженными понтонами.



Рис. 1. ППБУ «Северное Сияние».

Источник: <https://flot.gazprom.ru/press/news/2015/06/14/>

Архитектурно-конструктивные особенности ППБУ обеспечивают повышенный уровень удержания установки над точкой бурения по сравнению с буровыми судами и, таким образом, данный тип более предпочтителен для бурения в регионах с неблагоприятными условиями окружающей среды.

Также стоит упомянуть о классификации конструктивных элементов (КЭ), подразделяющихся на специальные (обеспечивают общую прочность конструкции, определяют усталостную прочность корпуса, характеризуются повышенным уровнем возникающих знакопеременных напряжений от общих и местных нагрузок), основные (обеспечивают общую прочность и непроницаемость корпуса) и вспомогательные (повреждение данных элементов не оказывает существенного влияния на безопасность ПТС) в зависимости от уровня напряжений, влияния возможного их повреждения на прочность и надежность ПТС.

### **Введение**

Актуальность использования данного типа плавучих буровых установок обусловлена тем, что к настоящему времени многие крупнейшие месторождения суши истощаются, в связи с чем разведка и добыча углеводородов все шире осуществляется на континентальном шельфе на глубинах более 200 м. В России ППБУ активно используются на этапах разведочного и эксплуатационного бурения на месторождениях Киринского перспективного блока, где ведет деятельность ПАО «Газпром».

Стоит также отметить, что данные ПТС также играют незаменимую роль для разбуривания лицензионных участков в навигационный период в Баренцевоморской газонефтеносной провинции, а также Южно-Карской газонефтеносной области (акватории Баренцева и Карского морей), где перспективными структурами как для текущего геологического изучения, так и для будущей подготовки к стадии промышленного освоения и ввода в эксплуатацию, являются Штокмановское газоконденсатное месторождение (ГКМ), Ледовое ГКМ, Лудловское газовое месторождение, Ленинградское ГКМ, Русановское ГКМ, месторождение им. В.А. Динкова и др.

Разработка данных газоносных провинций является основой для промышленного освоения углеводородного потенциала арктического шельфа, а также укрепляет позиции России в качестве ведущего игрока на глобальном энергетическом рынке.

### **Терминология, применяемая в отрасли**

В ранее существовавшей классификации, приведенной в Методике планирования и организации работы плавучих технических средств и определения их потребности для предприятий Главморнефтегаза [2] Министерства газовой промышленности СССР, ППБУ были отнесены к нефтегазопромысловому флоту, входили в подкласс средств океанотехники технического флота и относились к плавучим буровым установкам.

В настоящее время, согласно терминологии отечественного классификационного общества (КО) ФАУ «Российский морской регистр судоходства» (РС), ППБУ имеет основную словесную характеристику в символе класса согласно типу, назначению судна: «MODU semi-submersible» (Mobile offshore drilling unit semi-submersible) (далее – MODUSS) [3].

Обратимся к правилам классификации ведущих КО в области оффшорного флота, таких как DNV (Det Norske Veritas, Норвегия) и ABS (American Bureau of Shipping, США), так как именно под их надзором находится наибольшее количество ППБУ.

В руководствах и правилах DNV не представлена словесная характеристика таких сооружений по типу и назначению, однако имеется классификация групп таких объектов по дополнительным признакам, таким как архитектурно-конструктивный

тип и предназначение. Исходя из этого, такие объекты можно отнести к группе «Offshore drilling and support units» (морские буровые и вспомогательные установки).

В документации DNV ППБУ (MODUSS) рассматриваются как [4]:

- Drilling unit – техническое средство, предназначенное для морского бурения;
- Column-stabilised unit – сооружение, плавучесть и остойчивость которого обеспечивается за счет стабилизирующих колонн;
- Deep draught unit – плавучее сооружение с относительно большой осадкой, позволяющей избежать резонансные частоты механических колебаний (конструкция может иметь одну или несколько колонн).

ABS для классификации ППБУ (MODUSS) использует следующие определения [5]:

- Drilling Unit – буровая установка, предназначенная для участия в работах по разработке ресурсов в части морского эксплуатационного и разведочного бурения;
- Column-Stabilized Unit – установка, обладающая палубой, соединенная с помощью стабилизирующих колонн с подводными корпусами;
- Column-Stabilized Drilling Unit (см. описание данного термина в абзаце DNV);
- Semi-Submersible Unit – плавучее сооружение на стабилизирующих опорных колоннах, предназначенное для выполнения различных морских добычных работ на плаву, и удерживаемое на морском дне при помощи якорно-швартовых линий связи.

Отдельно следует отразить применяемую консалтинговым агентством Rystad Energy (Норвегия) классификацию плавучих буровых установок, основанную на терминологии брокеров и требованиях заказчиков буровых работ в основных регионах выполнения буровых работ [6].

- UDW Floaters (Ultra Deep Water) – ППБУ 6 и 7 поколений, обеспечивающие выполнение работ на глубинах более 7500-10000 футов (2286-3048 м);
- Harsh Floaters – ППБУ, имеющие соответствующие усиления корпуса, приспособленные к арктическим условиям (winter-ready/winterized), имеющие ледовый класс, а также обеспечивающие бурение в сложных гидрометеорологических условиях, включая ППБУ, имеющие необходимое подтверждение соответствия (Acknowledgement of Compliance, AoC);
- Ultra Harsh Floaters – ППБУ, имеющие подтверждение соответствия со стороны Норвежской администрации по нефтяной безопасности (Norway's Petroleum Safety Authority), либо иного аналогичного признанного органа;
- Moored Floaters – ППБУ и буровые суда, позиционирование/удержание которых на точке бурения обеспечивается с помощью якорных систем или натяжных связей.

Уже на данном этапе можно сделать вывод, что ППБУ классифицируются не по отдельной однозначной характеристике или одному параметру, а по совокупности факторов (т.е. учитывается состав оборудования, тип верхнего строения, глубина моря в районе эксплуатации, глубина бурения и др.). Например, одной из важнейших составляющих, определяющих классификацию ППБУ, является установленная на ней буровая установка, класс которой можно определить, например, по национальному российскому стандарту ГОСТ 16293-89 «Установки буровые комплектные для эксплуатационного и глубокого разведочного бурения. Основные параметры» (табл. 1). В упомянутом стандарте класс определяется в зависимости от глубины бурения и вида скважины, что дает однозначный взгляд на использование конкретного оборудования, в частности – буровой установки.

Таблица 1

**Классы буровых установок по ГОСТ 16293-89**

№ п/п	Глубина бурения, м	Допускаемая нагрузка на крюке, кН					Класс
		Очень легкие	Легкие	Средние	Тяжелые	Очень тяжелые	
1	1000	0,8					1
2	2000	1,0					2
3	3000		1,25				3
4	4000		1,6				4
5	5000			2,0			5
6	6000			2,5			6
7	7000				3,2		7
8	8000				4,0		8
9	9000					5,0	9
10	10000					6,3	10
11	12500					8,0	11
12	16000					10,0	12

Из изложенного выше можно сделать вывод о том, что классификационные общества не применяют классификацию ППБУ по поколениям, а определяют символ класса, исходя из предназначения конструктивно-архитектурных особенностей установок. Можно отметить, что подходы к классификации ППБУ по поколениям формируются исключительно эксплуатирующими организациями, различными отраслевыми объединениями и аналитическими агентствами, а также специалистами и экспертами отрасли. Исходя из этого, ППБУ можно классифицировать по основным признакам (Рис. 2):

В отрасли морского бурения четко видны следующие тенденции по изменению региона работ в районах с большей глубиной моря:

- в отрасли наблюдается переход к бурению в сверхглубоких водах;
- в Мексиканском заливе были пробурены скважины глубиной 39 955 футов (12177 метров);
- рекорд глубины бурения скважин на морских участках составляет 10 411 футов (3173 метра);
- очевидно, сохранится тренд к увеличению глубины бурения до 15 000 футов (4572 метра) и более.

Для достижения подобных результатов отрасли пришлось претерпевать существенные изменения, совершенствуя технологии и, таким образом, последовательно переходя при эксплуатации ППБУ от поколения к поколению. Год постройки (табл. 2) или глубина бурения, зависящая от нагрузки на крюке [13] и крутящем моменте верхнего привода, - неопределенный, неоднозначный и, в этой связи, недостаточный критерий для определения поколения ППБУ. Необходимо рассмотрение совокупности характеристик для идентификации поколения ППБУ.

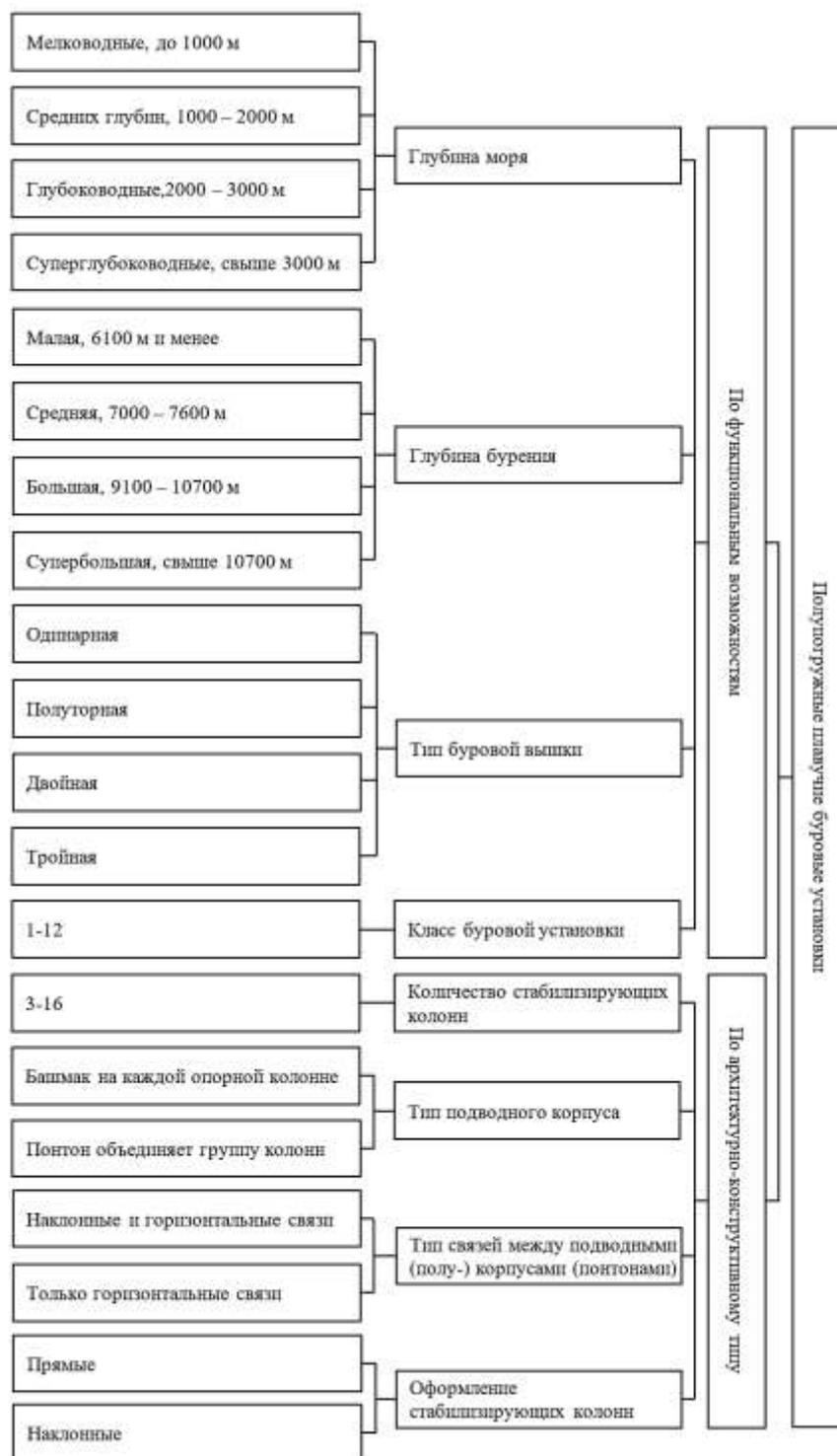


Рис. 2. Основные признаки классификации ППБУ [на основе анализа 7, 8, 9, 10, 11, 12].

Таблица 2

**Основные поколения ППБУ, определяемые периодом строительства и глубиной моря**

Поколение	Год постройки установки	Максимальная глубина
1	1961 – 1972	-
2	1973 – 1979	-
3	1980 – 1985	-
4	1986 – 1997	-
5	1998 – 2004	-
6	2005 и позднее	10 000 футов (3048 м)
7	2015 и позднее	12 000 футов (3658 м)

Кроме того, ППБУ в зависимости от глубины бурения разделяют на:

- Midwater (для бурения на средних глубинах) – до 4 000 футов (1219 м);
- Deepwater (для глубоководного бурения) – на глубинах 4 001 – 7 499 футов (1220 – 2286 м);
- Ultra-deepwater (для сверхглубоководного бурения) – на глубинах 7 500 футов (2286 м) и более;

**Краткий обзор отрасли**

Проанализируем рынок, состоящий из компаний, предоставляющих услуги в области морского бурения. За рубежом его объем определяется, исходя из рыночной капитализации компаний данного сектора, осуществляющих листинг на Нью-Йоркской фондовой бирже (New York Stock Exchange, NYSE) (Рис. 3).

По состоянию на начало 2023 года общий мировой флот насчитывает 106 плавучих буровых установок полупогружного типа, владельцами которых являются: Valaris Limited (VAL, Бермудские о-ва), Helmerich & Payne, Inc. (HP, США), Noble Corporation (NE, Великобритания), Transocean Ltd. (RIG, Швейцария), Patterson-UTI Energy, Inc. (PTEN, США), Seadrill (SDRL, Великобритания), Nabors Industries Ltd. (NBR, Бермудские о-ва), Borg Drilling Limited (BORR, Бермудские о-ва), Diamond Offshore Drilling, Inc. (DO, США), Precision Drilling Corporation (PDS, Канада), Independence Contract Drilling, Inc. (ICD, США) [14].

Помимо этого, в данном секторе представлены и другие компании, не котирующиеся на Нью-Йоркской фондовой бирже: Odfjell Drilling (ODLO, Норвегия), Aker Drilling (AKD, Норвегия), Gulf Drilling International (GISS, Катар), Ocean Rig (ORIG, Острова Кайман), China Oilfield Services Limited (COSL, КНР), OOS International (Нидерланды) и др.

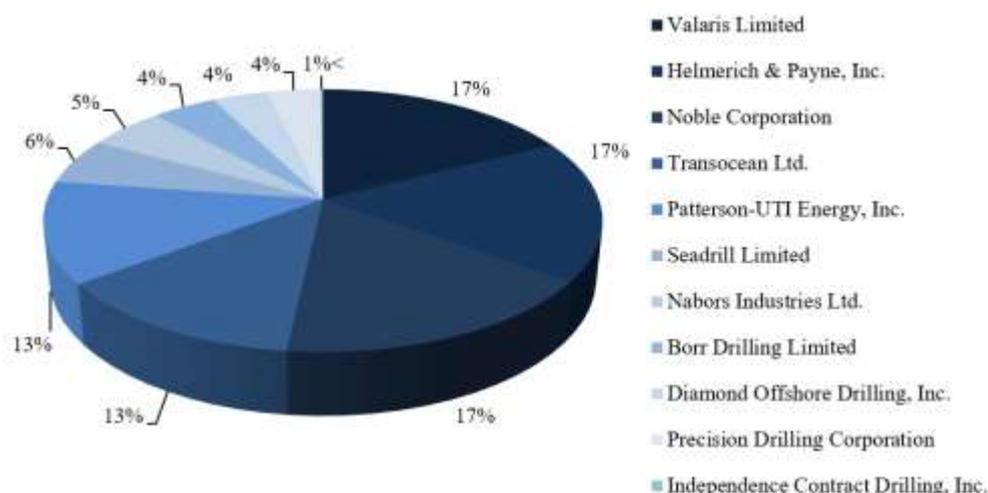


Рис. 3. Рынок подрядных компаний в области морского бурения [15].

### Рассмотрение варианта классификации ППБУ на примере компании Transocean Ltd.

Рассмотрим взгляд на классификацию одного из крупнейших игроков данного рынка - компании Transocean Ltd. Имея самый большой и разнообразный парк ПТС, располагая современными буровыми установками для обслуживания любого проекта, компания подразделяет весь свой флот ППБУ на две категории:

Ultra-deerwater (сверхглубоководные) (более 80% из 28 сверхглубоководных буровых установок компании имеют возраст менее 10 лет; 10 были поставлены в течение последних пяти лет, максимальная глубина моря колеблется от 7 500 (2286 м) до 12 000 футов (3658 м), максимальная глубина бурения - от 30 000 (9144 м) до 40 000 футов (12192 м));

Harsh environment (для суровых условий окружающей среды) (эксплуатируется 10 полупогружных установок для работы в суровых условиях (низких температур и сильного ветра), часть которых оснащена системами динамического позиционирования. Грузоподъемность палубы колеблется от 3700 до 7500 тонн).

В связи с неординарными задачами отрасли существует вопрос неоднозначного толкования и подходов к определению поколения технологий. Например, отечественная ППБУ «Шельф-1» (Рис. 4) предназначена для бурения разведочных скважин на нефть и газ глубиной до 6000 м, что соответствует 1-му поколению. Она может работать при глубинах моря до 200 м – данная характеристика также соответствует 1-му поколению. Также ППБУ «Frigstad Shekou» имеет глубину эксплуатации в море равную 3658 м и максимальную глубину бурения по стволу скважины равную 15240 м – обе ключевые характеристики соответствуют 7-му заявленному поколению. Но установка «Transocean Barents» имеет заявленное 6-го поколение, хотя при этом расчетная глубина эксплуатации с оборудованием действительно соответствует 6-му поколению, в то время как год постройки, численность персонала, глубина эксплуатации с оборудованием и определяющее – глубина бурения – соответствуют только 4-му поколению технологий.

Исходя из данных по техническим характеристикам ППБУ, в таблице 3 представлена классификация по поколениям и основные технические данные, а в таблице 4 представлен анализ флота компании, с присужденными «промежуточными» поколениями коллективом авторов [16].



Рисунок 4 – ППБУ типа «Шельф»

Источник: <https://cdbcorall.ru/catalog/plavuchie-polupogruznyye-burovye-ustanovki-ppbu/52/>

Таблица 3

**Основные технические характеристики поколений ППБУ**

Характеристика	Поколение						
	1	2	3	4	5	6	7
Глубина моря, футы (м)	135-600 (41-183)	600 (183)	1800 (549)	5000 (1524)	7500 (2286)	10-12000 (3048-3658)	Более 12 000 (3658)
Глубина бурения, футы (м)	25000 (7620)	25000 (7620)	25000 (7620)	25000 (7620)	35000 (10668)	37000 (11278)	Более 37000 (11278)
Нагрузка на крюке, т	1260	1260	1890	1890	4725	7182	7875
Количество буровых насосов	2	2	2-3	3	4	4-6	5-6
Наличие верхнего привода	-	-	-	+	+	+	+
Трубный манипулятор	-	-	-	+	+	+	+
Двойная буровая вышка	-	-	-	-	-/+	+	+
Количество превенторов	2	2	1-2	1	1	1-2	2
Наличие тележек для труб	-	-	-	-	+	+	+
Активный компенсатор кронблока	-	-	-	-	-	+	+
Топливо, (bbls) л.	(1150) 182850	(1982) 315138	(2015) 320385	(5318) 845562	(20000) 3180000	(20000) 3180000	(25942) 4124778
Технические масла (ГСМ), (bbls) л.	0	(2900) 461100	(3161) 502599	(3750) 596250	(9215) 1465185	(9215) 1465185	(7132) 1133988
Численность персонала, чел.	84	96	100	120	200	200	200+
Год постройки	1961 (1963)	1969	1980	1990	1998	2008	2015

Таблица 4

**Состав флота ППБУ Transocean Ltd.**

ППБУ	КО	Глубина моря, м	Глубина бурения, м	Год ввода в эксплуатацию	Поколение <sup>1</sup>
GSF Development Driller I (UD <sup>2</sup> )	ABS	2286 <sup>3</sup> (2286 <sup>4</sup> )	11430	2005	5+
Development Driller III (UD)	ABS	3048 (2286)	10668	2009	5(6)
Deepwater Nautilus (UD)	DNV	2926 <sup>5*</sup> (2438)	9144	2000 (2007 <sup>6</sup> )	4(5)
Henry Goodrich (HE <sup>7</sup> )	DNV	1524 (1524)	9144	1985	3(4)
Paul B. Loyd JR. (HE)	DNV	600 (600)	9144	1990	3(4)
Transocean Barents (HE, DA <sup>8</sup> )	DNV	3048 (1981)	6096	2009	4+
Transocean Enabler (HE)	DNV	500	9144	2016	4+
Transocean Encourage (HE)	DNV	500	8500	2016	4+
Transocean Endurance (HE)	DNV	500	8500	2015	4+
Transocean Equinox (HE)	DNV	500	8500	2015	4+
Transocean Leader (HE)	DNV	1676 (1372)	7620	1987 (1997, 2012)	4
Transocean Norge (HE)	DNV	3000 (1000)	12200	2019	5+
Transocean Spitsbergen (HE, DA)	DNV	3048 (1981)	9144	2009	4+

К дополнительным преимуществам современных ППБУ следует отнести наличие строенной системы жидкого бурового раствора с двойной изоляцией, одновременным управлением тремя отдельными жидкостными системами, эффективной системы очистки, а также гибридной энергетической системы, обеспечивающей более эффективную нагрузку на генераторы и двигатели, повышенную топливную

<sup>1</sup> Знаком «+» в таблице показаны поколения ППБУ, которые по различным параметрам

<sup>2</sup> UD - Ultra-Deepwater - для сверхглубоководного бурения.

<sup>3</sup> Глубина моря ПТС, соответствующая расчетным, проектным данным.

<sup>4</sup> Глубина моря ПТС, снабженного оборудованием, согласно практическим данным.

<sup>5\*</sup> Глубина моря ПТС, соответствующая реальной глубине эксплуатации установки.

<sup>6</sup> Год модернизации ПТС переоснащения, переоборудования.

<sup>7</sup> HE - Harsh environment - для суровых условий окружающей среды.

<sup>8</sup> DA - Dual-Activity – возможность бурения с двух буровых станков.

экономичность, сокращение выбросов и использование технологии очистки выхлопных газов [17].

Немаловажно отметить, что помимо перечисленных существует определенный вид ПТС – Semi-submersible FPU (Floating Production Unit), например, ППБУ «Shell Appomantox», верхнее строение которой позволяет, не ограничиваясь бурением, производить на борту готовую продукцию, получая продукт из подводных устьев скважин. Но при этом данная установка действительно является полупогружной, несмотря на наличие наклонных якорных линий связи в виде оттяжек, закрепляющих данное плавучее сооружение на морском дне, так как подводный корпус ПТС представляет собой монолитный сквозной полупогружной блок, соединяющий все стабилизирующие колонны и имеющий большую осадку вместо привычных понтонов, опорных башмаков в классическом исполнении ППБУ [18].

Технологии глубоководного бурения не стоят на месте. В настоящее время уже широко эксплуатируются ППБУ 7-го поколения, а на рынке буровых судов (БС) ожидаемо появляются технологии 8-го поколения. В частности, БС «Deerwater Titan» – это уже второе (2023 г. постройки) буровое судно, способное работать при глубине моря 12 000 футов (3657 м), обеспечивая глубину бурения до 40 000 футов (12192 м). При сравнении ключевых рабочих характеристик данного бурового судна с судами предыдущего, 7-го, поколения можно отметить, что при равных рабочих глубинах моря, максимальная глубина бурения более старых судов составляет лишь 35 000 футов (10668 м), а приращение в длине скважины по стволу (около 1500 м) открывает для отрасли новые возможности [19,20].

### **Заключение**

Подытоживая представленные в статье данные, можно сделать следующие выводы.

В отрасли нет единого стандарта или строгого определения подходов к классификации буровых установок по поколениям. Поколение определяется годом ввода в эксплуатацию и ключевыми техническими характеристиками ППБУ.

Полупогружная плавучая буровая установка 7-го поколения – это буровая установка, поступившая в эксплуатацию не позднее 2015 года, имеющая следующие технические характеристики: глубина моря – 12 000 футов (3657 м); глубина бурения – 40 000 футов (12191 м); нагрузка на крюке – 1250 тонн; гибридное питание – доступно; переменная нагрузка на палубу - 25 350 тонн.

В целом классификация ППБУ – это не только совокупность технических характеристик (вес на крюке, глубина бурения, год постройки и др.). Она включает различные параметры и характеристики, требуемые для достижения целей и задач буровых работ на месторождении, исходя из запросов заказчика под конкретный проект в зависимости от географии, условий окружающей среды или глубины моря.

### **Список литературы**

1. Официальный сайт ФАУ «Российский морской регистр судоходства». Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ. Санкт-Петербург 2018. ISBN 978-5-89331-206-5. НД № 2-020201-015.
2. Методика планирования и организации работы плавучих технических средств и определения их потребности для предприятий Главморнефтегаза : врем. методика / Всесоюз. н.-и. и проект.-конструкт. ин-т по пробл. освоения нефти и газовых ресурсов континент. Шельфа: разраб. П. А. Боровиков [и др.]. М.: ВНИИ экономики, орг. пр-ва и техн.-экон. информ. в газовой пром-сти, 1987. 132 с.
3. Казьмин С. А., Кораблева М. С., Лобанов А. В., Тимофеев О. Я. Особенности классификации судов нефтегазопромыслового флота // Известия КГТУ. №65. 2022. С. 118-132.

4. Официальный сайт DNV. Rules and standards : Rules for classification : Offshore units. URL: <https://www.dnv.com/energy/standards-guidelines/index.html?>
5. Официальный сайт ABS. URL: [https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/offshore/1001\\_mobileoffshoreunits\\_2018/mou-part-3-july-18.pdf](https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/offshore/1001_mobileoffshoreunits_2018/mou-part-3-july-18.pdf).
6. Offshore rig report February 2021. Rig analytics, Rystad Energy.
7. Курс лекций «Основы морского бурения» / Кафедра океанотехники и морских технологий, Факультет кораблестроения и океанотехники, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет / к.х.н. Чеснокова И.Г.
8. Плавающие полупогружные буровые установки: история, современность, перспективы. Аналитический обзор. – СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2014. – 212 с., ил. ISBN 978-5-903002-53-5
9. А.В. Лобанов, К.С. Вераксо, О.Л. Архипова, Л.А. Сайфуллина Концепция и преимущества унификации конструкции морских ледостойких стационарных платформ при освоении углеводородных ресурсов арктических морей // Газовая промышленность. №8. 836. 2022г. с. 20-26.
10. А.Н. Ефимов, А.И. Домрачев, А.В. Ларионов, А.В. Лобанов, К.С. Вераксо Формирование нормативной базы в области организации работы персонала морских стационарных платформ на этапе эксплуатации // Газовая промышленность. №5. 816. 2021г. с. 48-53.
11. А.В. Лобанов, М.С. Кораблева Обзор рынка морских сейсморазведочных судов и оценка целесообразности создания подводного комплекса сейсморазведки // Газовая промышленность. №4. 815. 2021г. с. 20-38.
12. Лобанов А.В. Оценка возможностей Российских предприятий по строительству морской техники в интересах ПАО «Газпром» // Сборник статей победителей V конкурса «Нефтегазовый комплекс: экономика, политика, экология» 23 апреля 2019г. – СПб.: Изд-во СПбГЭУ, 2020. – 241с., с. 82-93. ISBN 978-5-7310-4869-9.
13. Официальный сайт infield rigs. URL: <https://www.infield.com/rigs/semisub-rigs>.
14. Официальный сайт Finviz. URL: [https://finviz.com/screener.ashx?v=1111&f=ind\\_oilgasdrilling&o=-marketcap](https://finviz.com/screener.ashx?v=1111&f=ind_oilgasdrilling&o=-marketcap).
15. Официальный сайт investing. URL: [https://ru.investing.com/stock-screener/?sp=country::5|sector::a|industry::174|equityType::a|exchange::a%3Ceq\\_market\\_ca](https://ru.investing.com/stock-screener/?sp=country::5|sector::a|industry::174|equityType::a|exchange::a%3Ceq_market_ca)
16. Официальный сайт Transocean. URL: <https://www.deepwater.com/our-fleet/our-rigs>
17. «What is a «7th Generation» Ultra-deepwater Drillship?», October 17, 2013.
18. Официальный сайт Offshore Technology. URL: <https://www.offshore-technology.com/projects/appomattox-deepwater-development-gulf-of-mexico/>.
19. Официальный сайт offshore-energy. URL: <https://www.offshore-energy.biz/sembcorp-marine-delivers-giant-worlds-first-8th-generation-drillship-to-transocean/>.
20. Официальный сайт Offshore Engineer. URL: <https://www.oedigital.com/news/501546-great-ships-22-deepwater-atlas-world-s-first-eighth-gen-ultra-deepwater-drillship>

#### References

1. Official site of the Russian Maritime Register of Shipping. Pravila klassifikatsii, postroiki i oborudovaniya plavuchikh burovnykh ustanovok i morskikh statsionarnykh platform. Sankt-Peterburg 2018. ISBN 978-5-89331-206-5. ND № 2-020201-015
2. Metodika planirovaniya i organizatsii raboty plavuchikh tekhnicheskikh sredstv i opredeleniya ikh potrebnosti dlya predpriyatiy Glavnorneftegaza. Vsesoyuznyy nauchno-issledovatel'skiy i proektno-konstruktorskiy institut po problem. osvoeniya neftyanykh i gazovykh resursov kontinental'nogo shel'fa, razrab. P. A. Borovikov [i dr.]. Moscow, Vsesoyuznyy nauchno-issledovatel'skiy institut ekonomiki, organizatsii proizvodstva i tekhniko-ekonomicheskoy informatsii v gazovoy promyshlennosti Publ., 1987. 132 p.
3. Kazmin S. A., Korableva M. S., Lobanov A. V., Timofeev O. Ya. Features of the classification of vessels of the oil and gas field fleet. Izvestiya KGTU = KSTU News. №65. 2022. P. 118-132
4. Official site of the DNV. Rules and standards : Rules for classification: Offshore units. URL: <https://www.dnv.com/energy/standards-guidelines/index.html?>
5. Official site of the ABS. URL: [https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/offshore/1001\\_mobileoffshoreunits\\_2018/mou-part-3-july-18.pdf](https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/offshore/1001_mobileoffshoreunits_2018/mou-part-3-july-18.pdf)

6. Offshore rig report February 2021. Rig analytics, Rystad Energy.
7. Kurs lektsii «Osnovy morskogo bureniYA» / «Kafedra okeanotekhniki i morskikh tekhnologii», «Fakul'tet korablestroeniya i okeanotekhniki», Sankt-Peterburgskii Gosudarstvennyi morskoi tekhnicheskii universitet / k.kh.n. Chesnokova I.G.
8. Plavuchie polupogruzhnye burovye ustanovki: istoriya, sovremennost', perspektivy. Analiticheskii obzor. – SPb.: FGUP «Krylovskii gosudarstvennyi nauchnyi tsentR», 2014. – 212 p., il. ISBN 978-5-903002-53-5
9. A.V. Lobanov, K.S. Verakso, O.L. Arkhipova, L.A. Saifullina Kontsepsiya i preimushchestva unifikatsii konstruksii morskikh ledostoikikh statsionarnykh platform pri osvoenii uglevodorodnykh resursov arkticheskikh morei // Gazovaya promyshlennost'. №8. 836. 2022. p. 20-26.
10. A.N. Efimov, A.I. Domrachev, A.V. Larionov, A.V. Lobanov, K.S. Verakso Formirovanie normativnoi bazy v oblasti organizatsii raboty personala morskikh statsionarnykh platform na ehtape ehkspluatatsii // Gazovaya promyshlennost'. №5. 816. 2021. p. 48-53.
11. A.V. Lobanov, M.S. Korableva Obzor rynka morskikh seismorazvedochnykh sudov i otsenka tselesoobraznosti sozdaniya podvodnogo kompleksa seismorazvedki // Gazovaya promyshlennost'. №4. 815. 2021. p. 20-38.
12. Lobanov A.V. Evaluation of opportunities of Russian enterprises for the construction of maritime technology for the PJSC Gazprom interests // Sbornik statei pobeditelei V konkursa «Neftegazovyi kompleks: ehkonomika, politika, ehkologiYA» 23 aprelya 2019. SPb.: Izd-vo SPBGEHU, 2020. – 241p., p. 82-93. ISBN 978-5-7310-4869-9.
13. Official site of the infield rigs. URL: <https://www.infield.com/rigs/semisub-rigs>
14. Official site of the FINVIZ. URL: [https://finviz.com/screener.ashx?v=111&f=ind\\_oilgasdrilling&o=-marketcap](https://finviz.com/screener.ashx?v=111&f=ind_oilgasdrilling&o=-marketcap)
15. Official site of the investing. URL: [https://ru.investing.com/stock-screener/?sp=country::5|sector::a|industry::174|equityType::a|exchange::a%3Ceq\\_market\\_ca](https://ru.investing.com/stock-screener/?sp=country::5|sector::a|industry::174|equityType::a|exchange::a%3Ceq_market_ca)
16. Official site of the Transocean. URL: <https://www.deepwater.com/our-fleet/our-rigs>
17. «What is a «7th Generation» Ultra-deepwater Drillship?», October 17, 2013
18. Official site of the Offshore Technology. URL: <https://www.offshore-technology.com/projects/appomattox-deepwater-development-gulf-of-mexico/>
19. Official site of the offshore-energy. URL: <https://www.offshore-energy.biz/sembcorp-marine-delivers-giant-worlds-first-8th-generation-drillship-to-transocean/>
20. Official site of the Offshore Engineer. URL: <https://www.oedigital.com/news/501546-greatships-22-deepwater-atlas-world-s-first-eighth-gen-ultra-deepwater-drillship>

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Казьмин Сергей Алексеевич**, студент кафедры Океанотехники и морских технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, улица Лоцманская, дом 3, e-mail: kazmin.energy@gmail.com

**Sergei A. Kazmin**, Student of the Department of «Ocean Engineering and Marine Technologies» of the State Marine Technical University, Lotsmanskaya Street, 10, Saint-Petersburg, 190121, Russia, e-mail: kazmin.energy@gmail.com

**Лобанов Алексей Валериевич**, кандидат технических наук, начальник отдела обеспечения морской деятельности и эксплуатации морской техники, ПАО «Газпром», 197229, Санкт-Петербург, проспект Лахтинский, дом 2, корпус 3, строение 1, e-mail: al.lobanov@adm.gazprom.ru

**Aleksey V. Lobanov**, candidate of technical sciences, Head of the Department of Marine Activities and Operation of Marine Equipment Operation, PJSC Gazprom, Lakhtinsky Avenue, 2, 3, 1, Saint-Petersburg, 197229, Russia, e-mail: al.lobanov@adm.gazprom.ru

**Вербицкий Сергей Владимирович**, заведующий кафедрой Океанотехники и морских технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, улица Лоцманская, дом 3, e-mail: ser\_verb@mail.ru

**Sergei V. Verbitskiy**, Head of the Department of «Ocean Engineering and Marine Technologies», of the State Marine Technical University, Lotsmanskaya Street, 10, Saint-Petersburg, 190121, Russia, e-mail: ser\_verb@mail.ru

Статья поступила в редакцию 03.05.2023; опубликована онлайн 20.06.2023.  
Received 03.05.2023; published online 20.06.2023.

УДК 629.123

DOI: 10.37890/jwt.vi75.357

## **Применение методов многокритериальной оптимизации для решения задачи проектирования судна**

**М.В. Китаев**

*ORCID: 0000-0001-5345-6333*

**И.А. Новосельцев**

*Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия*

**Аннотация.** В статье рассмотрено применение методов одно- и многокритериальной оптимизации применительно к решению задачи оптимизации проектных характеристик судна. Выполнен анализ влияния частных критериев оптимальности на значения проектных характеристик и элементов судна. Рассмотрены наиболее известные методы многокритериальной оптимизации и численный пример их применения для решения задачи обоснования проектных характеристик судна с учетом требований к его свойствам и качествам. Выполнено сравнение результатов, полученных разными методами многокритериальной оптимизации между собой, а также с результатами однокритериальной оптимизации. На численном примере показано, что попытка поиска компромисса зачастую приводит ухудшению значений частных критериев оптимальности. Установлено, что применение методов многокритериальной оптимизации для решения задач проектирования судов позволяет лучше понять роль каждого частного критерия оптимальности и оценить степень его влияния на показатели функциональной эффективности и проектные характеристики.

**Ключевые слова:** методы оптимизации, проектирование судов, характеристики судна, критерии эффективности, принятие решений, многокритериальный подход

## **Application of multicriteria optimization methods for solving the problem of ship design**

**Maksim V. Kitaev**

*ORCID: 0000-0001-5345-6333*

**Igor A. Novoseltcev**

*Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia*

**Abstract.** The article considers the application of single-and multi-criteria optimization methods in relation to solving the problem of optimizing the ship's design characteristics. The analysis of the influence of particular optimality criteria on the values of the design characteristics and elements of the ship has been carried out. The most well-known methods of multicriteria optimization and a numerical example of their application for solving the problem of substantiating the design characteristics of a vessel, taking into account the requirements for its properties and qualities, are considered.

The results obtained by different methods of multicriteria optimization are compared with each other, as well as with the results of single-criteria optimization. A numerical example shows that an attempt to find a compromise often leads to a deterioration in the values of particular optimality criteria. It has been established that the use of multi-criteria optimization methods for solving ship design problems makes it possible to understand the role of each particular optimality criterion better and assess the degree of its influence on functional efficiency indicators and design characteristics.

**Keywords:** optimization methods, ship design, ship characteristics, efficiency criteria, decision making, multi-criteria approach.

### **Введение**

При проектировании судов для поиска оптимальных вариантов решений используют различные виды критериев. Как и в любом другом виде инженерной деятельности, в зависимости от целей и системного уровня задачи в качестве критериев могут рассматриваться технические, эксплуатационные и экономические показатели. В большинстве случаев экономические критерии рассматривают как основополагающие, так как именно на основе анализа экономических показателей на практике чаще всего определяют целесообразность создания того или иного объекта [1, 2].

Несмотря на большое количество публикаций и научных исследований, посвященных вопросам технико-экономического обоснования, к настоящему времени так и не создано единого (универсального) подхода к выбору критерия, который можно применять при проектировании судов и других объектов морской техники. Отсутствие единого критерия определяется тем фактом, что в различных экономических условиях для оценки эффективности проектируемого объекта морской техники используют разные методологические подходы и показатели эффективности [3 - 5].

Например, если исходить из того, что продукцией морского транспорта является перевозка, а основная деятельность судоходных компаний направлена получение дохода (прибыли), то годовой доход вполне можно рассматривать в качестве основного критерия. Однако в некоторых случаях он может быть равен нулю, например, для военных кораблей, научно-исследовательских судов, ледоколов, судов обеспечения и др. Критерий приведенных затрат, широко применявшийся в условиях плановой экономики, также имеет ограниченную область применения, т.к. требует равенства срока службы и проектных характеристик (водоизмещения, мощности, грузоподъемности, годового объема перевозок и других показателей) сравниваемых судов. В условиях конкуренции при рыночном ценообразовании затраты конкретного перевозчика не всегда являются основой для формирования стоимости фрахта на заданном направлении перевозок.

Кроме того, существуют национальные (исторически обусловленные) предпосылки к формированию методик расчета и выбору перечня показателей сравнительной экономической эффективности объектов морской техники, характерные как для отечественной, так и для зарубежной практик проектирования [1 - 5]. Немаловажную роль в принятии проектных решений имеют субъективные оценки проектанта, инвестора или другого лица, ответственного за принятие решений (ЛПР), основанные на собственном опыте и интуиции [6].

В конечном счете, если подходить системно, то оценить эффективность и целесообразность создания такого сложного инженерного сооружения как судно, одним показателем просто невозможно т.к. на различных этапах его жизненного цикла (проектирование, постройка, эксплуатация и утилизация) используются различные по структуре, составу и количеству ресурсы, по-разному распределённые во времени и характеризующиеся разными по своей сути показателями, отражающими интересы проектанта, завода-строителя, судовладельца и инвестора. Вследствие этого критерии часто являются противоречивыми, а попытка учесть несколько показателей эффективности приводит к многокритериальности, т.е. к необходимости поиска компромисса и как следствие к неопределенности [6, 7].

### Влияние критериев на характеристики и элементы судна

Наиболее понятными с позиций принятия решений являются однокритериальные задачи оптимизации [8]. Математическую модель однокритериальной задачи представим в следующем виде:

$$\begin{aligned} f(\mathbf{x}^*) &= \min f(\mathbf{x}), \\ \mathbf{x} &\in X \\ g(\mathbf{x}) &= 0, \quad i = 1, \dots, m, \\ h(\mathbf{x}) &\leq 0, \quad j = 1, \dots, k \\ \mathbf{x}_l &\leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_u. \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\mathbf{x}$  – вектор значений оптимизируемых переменных  $\mathbf{X} \in \mathbf{R}^n$ ;  $x_l$  и  $x_u$  – диапазоны изменения значений оптимизируемых переменных.

Модели вида (1) являются универсальными, т.к. позволяют учитывать линейные и нелинейные ограничения в виде равенств и неравенств, а также требования к значениям и диапазонам изменения оптимизируемых переменных, в качестве которых выступают характеристики и элементы проектируемого судна. Для поиска оптимальных решений используют методы первого, второго порядка, квазиньютоновские и др. алгоритмы [8].

С учетом специфики существующих алгоритмов оптимизации, как правило ориентированных на поиск минимума целевой функции, переход от задачи на поиск минимума к задаче на поиск максимума осуществляется путем замены знака  $f(\mathbf{x})$  на  $-f(\mathbf{x})$ .

В настоящем исследовании на численном примере показано влияние различных критериев на значения функциональных показателей, проектных характеристик и элементов судна. Для получения результатов использовалась математическая модель проектирования навалочного судна, подробно рассмотренная в работе [9].

Для сравнительной оценки результатов оптимизации расчеты выполнены для одних и тех же исходных данных: тип судна – балкер, стоимость топлива - 500 долл./т., протяженность линии - 2500 миль, нормы грузообработки - 8000 тонн/сут.

Диапазоны изменения значений оптимизируемых переменных приняты следующие:  $150 \leq L \leq 270$ ;  $20 \leq B \leq 32$ ;  $13 \leq H \leq 25$ ;  $7 \leq T \leq 11,71$ ;  $14 \leq V_s \leq 18$ ;  $0,63 \leq C_b \leq 0,8$ . Диапазон изменения расчетных значений дедвейта  $25000 \leq DW \leq 500000$ , остальные ограничения приняты как в работе [9].

В табл. 1 приведены результаты оптимизации, выполненной для различных критериев, в качестве которых рассматривались следующие показатели:  $f_1$  – строительная стоимость судна ( $I$ , млн. долл.);  $f_2$  – транспортные расходы  $TRC$ , долл./т.;  $f_3$  – годовые эксплуатационные расходы ( $C$ , млн. долл.);  $f_4$  – годовой грузооборот одного судна ( $Q$ , млн. т./год);  $f_5$  – водоизмещение судна порожнем ( $D_0$ , тонн).

Таблица 1

Результаты оптимизации характеристик и элементов судна

Критерий	Минимум $f_1$	Минимум $f_2$	Минимум $f_3$	Максимум $f_4$	Минимум $f_5$
$I$ , млн. долл.	12,519	19,700	12,905	28,761	12,801
$TRC$ , долл./т.	17,74	14,03	16,56	23,27	19,75
$C$ , млн. долл.	6,845	8,344	6,406	16,716	7,597
$Q$ , млн. т. /год	0,386	0,595	0,387	0,718	0,385
$D_0$ , тонн.	5426	11216	5983	13021	5277

Значения проектных характеристик и элементов					
$L$ , м	153,85	222,49	166,46	222,49	150,00
$B$ , м	25,64	32,00	27,74	32,00	24,10
$H$ , м	13,84	15,73	13,84	15,73	13,84
$T$ , м	10,39	11,71	10,39	11,71	10,39
$V_s$ , уз.	14,00	14,00	14,00	18	14
$C_b$	0,72	0,69	0,63	0,80	0,78
$DW$ , т.	25000	47966	25000	55343	25000
$N$ , кВт	5540	6480	4635	24910	6753

Из анализа табл. 1 следует, что в зависимости от критерия оптимальности суда претенденты отличаются характеристиками, главными размерениями, экономическими и функциональными показателями. Так судно, спроектированное по критерию минимума строительной стоимости, отличается от альтернативных вариантов наименьшими значениями водоизмещения, мощности энергетической установки, скорости и главных размерений.

При поиске минимума показателя, характеризующего транспортные (рейсовые) расходы получено судно, имеющее наибольшие значения проектных характеристик и главных размерений, скорость хода ограничена нижним пределом ограничений.

При минимизации годовых эксплуатационных расходов решением является судно, отличающееся от альтернативных вариантов минимальной мощностью энергетической установки, дедвейтом, скоростью и общей полнотой.

Оптимизация по годовому грузообороту приводит к максимально возможному увеличению значений проектных характеристик и элементов, что приводит к значительному росту строительной стоимости и себестоимости перевозок.

Решение, полученное в результате поиска минимума водоизмещения порожнем, характеризует вариант с наименьшими значениями главных размерений.

Таким образом, однокритериальный подход дает однозначный результат в случае принятия в качестве основного какого-либо одного из локальных критериев оптимальности, т.е. позволяет получить вариант судна, который характеризуется определенным сочетанием проектных характеристик и элементов. В результате выполненных расчетов установлено, что в случае независимости частных критериев оптимальности невозможно получить вариант судна, который бы являлся наилучшим по нескольким критериям оптимальности одновременно. Это видно из данных табл. 1.

При рассмотрении нескольких показателей эффективности перед проектантом возникает проблема выбора оптимального варианта судна, заключающаяся в наличии нескольких альтернативных вариантов проектных решений, отличающихся характеристиками, элементами и эксплуатационно-экономическими показателями. В этом случае желание найти компромиссный вариант приводит к необходимости решать проектную задачу в многокритериальной постановке.

Рассмотрим и проанализируем влияние критериев и методов многокритериальной оптимизации на значения показателей функциональной эффективности, проектных характеристик и главных размерений судна сравнив их с значениями, полученными при решении проектной задачи в однокритериальной постановке.

### **Многокритериальный подход**

Результаты, полученные в предыдущем разделе, подтверждают тот факт, что задачи проектирования сложных технических систем, к которым относятся суда, целесообразно рассматривать и решать в многокритериальной постановке, когда различные варианты проектных решений оцениваются посредством анализа совокупности частных критериев оптимальности  $f_1, \dots, f_m$ . Переход к многокритериальности обусловлен желанием проектанта найти компромисс. Как правило, такие задачи рассматриваются в рамках теории принятия решений и

обладают спецификой (в сравнении с однокритериальными) в части поиска оптимального варианта.

В общем случае многокритериальные задачи не имеют строгого математического решения, несмотря на многообразие методов их решения. Проблема состоит в неопределенности выбора критерия, удовлетворяющего запросы всех участников процесса проектирования судна и неоднозначности оптимального решения, т.к. критерии могут быть противоречивыми, разнонаправленными (в одной и той же точке один из критериев может достигать максимума, а другой минимума) и иметь разную размерность и др.

Многокритериальную задачу оптимизации запишем в виде:

$$\begin{cases} F(\mathbf{x}) \rightarrow \max \\ \mathbf{x} \in D \end{cases}, \quad (2)$$

где  $D$  - область допустимых решений;  $\mathbf{x}$  – вектор оптимизируемых переменных;  $F(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x}))$  – векторная целевая функция;  $f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x})$  – скалярные целевые функции (характеризуют частные критерии оптимальности) векторного аргумента  $\mathbf{x}$ .

Суть большинства методов многокритериальной оптимизации состоит в сведении многокритериальной задачи к однокритериальной. Наиболее известными являются следующие [10, 11]:

- метод главного критерия;
- метод свертывания критериев;
- метод равномерной оптимальности;
- метод идеальной точки;
- метод последовательных уступок;
- метод справедливого компромисса;
- метод группировки критериев;
- и др.

Для иллюстрации многокритериального подхода рассмотрим применение некоторых из вышеуказанных методов применительно к решению задачи оптимизации характеристик судна и сравним полученные результаты. Для сокращения объема вычислений за основу возьмем только три основных критерия:  $f_1$  – строительная стоимость судна ( $I$ , млн. долл.);  $f_3$  – годовые эксплуатационные расходы ( $C$ , млн. долл.);  $f_4$  – годовой грузооборот одного судна ( $Q$ , млн. т./год).

Для нормализации критериев использовалась формула [11]:

$$\bar{f}_j = \frac{f_j(\mathbf{x}) - f_j^{\min}}{f_j^{\max} - f_j^{\min}}, j = 1, \dots, n. \quad (3)$$

Значения составляющих в формуле (3) рассчитываются следующим образом:

$$f_j^{\max} = \max_{\mathbf{x} \in D} f_j(\mathbf{x}), f_j^{\min} = \min_{\mathbf{x} \in D} f_j(\mathbf{x}), f_j^{\max} \neq f_j^{\min} \quad (4)$$

В табл. 2 приведены предельные (максимальные и минимальные) значения принятых в качестве основных критериев оптимальности, вычисленные по формуле (4).

Таблица 2

**Предельные значения рассматриваемых критериев**

Критерий	Обозн.	Максимальное значение	Минимальное значение
Строительная стоимость судна, млн. долл.	f1	29,92	12,52
Годовые эксплуатационные расходы, млн. долл.	f3	22,07	6,40
Годовой грузооборот, млн. тонн/год	f4	0,718	0,382

Кратко охарактеризуем основные методы решения многокритериальных задач.

Согласно методу равномерной оптимальности лучшей считается альтернатива, которая обладает максимальной суммой частных критериев оптимальности [11]:

$$f^*(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^n \bar{f}_j(\mathbf{x}) \rightarrow \max. \quad (5)$$

Согласно методу справедливого компромисса выбор лучшей альтернативы осуществляется на основе максимального значения произведения частных критериев [11]:

$$f^*(\mathbf{x}) = \prod_{j=1}^n \bar{f}_j(\mathbf{x}) \rightarrow \max. \quad (6)$$

Метод свертывания критериев состоит в том, что каждому из анализируемых критериев присваивается весовой коэффициент, характеризующий степень его значимости. Наиболее часто используемым методом является аддитивная свертка критериев [11]:

$$f^*(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^n \alpha_j \bar{f}_j(\mathbf{x}) \rightarrow \max, \quad (7)$$

где  $\sum_{j=1}^n \alpha_j = 1$  - весовые коэффициенты, характеризующие степень важности частных критериев оптимальности и определяющие предпочтения ЛПР.

Использование аддитивной свертки подразумевает, что при решении задачи с привлечением разных по квалификации и информированности специалистов, оценки значимость частных критериев оптимальности могут отличаться, следовательно результатом будут являться разные варианты проектных решений.

В случае использования метода идеальной точки решением является альтернатива, в которой вектор значений частных критериев оптимальности по норме минимально отличается от идеальной точки (точки утопии) [11]:

$$f^*(\mathbf{x}) = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\bar{f}_j(\mathbf{x}) - f_j^*)^2} \rightarrow \min, \quad (8)$$

где  $f^* = (\max_{x \in D} f_1(x), \max_{x \in D} f_2(x), \dots, \max_{x \in D} f_n(x))$  – вектор, состоящий из

максимальных значений частных критериев (идеальная точка)  $f^* \notin D$ .

Метод главного критерия также предполагает сведение многокритериальной задачи оптимизации к однокритериальной для этого один из частных критериев оптимальности принимается в качестве главного, а остальные переходят в разряд ограничений задаваемых ЛПР в числе исходных данных [11]:

$$\begin{aligned} f_j^*(\mathbf{x}) &= f_j(\mathbf{x}) \rightarrow \max, \\ f_j(\mathbf{x}) &\geq t_j, j = 2, \dots, n. \end{aligned}$$

где  $t_j$  – верхняя / нижняя границы частного критерия оптимальности.

В любом случае значения оптимизируемых переменных должны принадлежать множеству допустимых решений  $\mathbf{x} \in D$ .

В табл. 3 приведены результаты решения задачи оптимизации характеристик судна, полученные методом главного критерия, в качестве которого принят показатель, характеризующий годовые эксплуатационные расходы  $C$  (критерий  $f_3$ ), а строительная стоимость  $I$  (критерий  $f_1$ ) и годовой грузооборот судна  $Q$  (критерий  $f_4$ ) выступали в качестве ограничений  $t_j$ .

Анализ результатов вычислений (см. табл. 3), говорит о том, что любые попытки поиска оптимального решения посредством использования дополнительных ограничений (в нашем случае к значениям годового грузооборота  $Q$  и строительной стоимости судна  $I$ ) приводят к ухудшению главного критерия ( $f_3$ ) по отношению к значению, полученному в результате решения однокритериальной задачи оптимизации (см. табл. 1). В то же время, значения частных показателей функциональной эффективности, принятые при решении задачи в качестве ограничений, могут быть улучшены, но только за счет ухудшения других показателей

(в том числе и главного критерия). Это говорит о том, что найденные решения являются оптимально-компромиссными, а соответствующие им значения вектора  $x \in D$  характеризуют эффективные точки [12]. Полученные результаты подтверждают тот факт, что введение дополнительных ограничений не улучшает оптимального решения (не влияет на него), ухудшает оптимальное решение, либо создает несовместность [13]. Особенностью рассматриваемого метода, является то, что при определенном сочетании значений  $t_j$  формуле (9), характеризующих требования к  $Q$  и  $I$ , задача решений не имеет.

Таблица 3

**Результаты многокритериальной оптимизации (метод главного критерия)**

Обозначение	$I \leq 12,805$ $Q \geq 0,387$	$I \leq 12,705$ $Q \geq 0,387$	$I \leq 12,605$ $Q \geq 0,387$	$I \leq 12,905$ $Q \geq 0,396$	$I \leq 12,905$ $Q \geq 0,400$	$I \leq 12,805$ $Q \geq 0,396$
TRC, долл./т.	16,65	16,79	17,05	16,63	16,76	16,96
I, млн. долл.	12,805	12,705	12,605	12,905	12,905	12,805
C, млн. долл.	6,440	6,497	6,595	6,598	6,702	6,730
Q, млн. т./год	0,387	0,387	0,387	0,397	0,400	0,397
DW, т	25000	25021	25040	25914	26208	25938
N, кВт	4731	4866	5074	4998	5190	5265
L, м	164,32	161,82	158,73	162,43	160,56	158,90
B, м	27,39	26,97	26,46	27,07	26,76	26,48
H, м	13,84	13,85	13,85	14,01	14,06	14,01
T, м	10,39	10,39	10,39	10,51	10,54	10,51
Vs, уз.	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00
Cb	0,64	0,66	0,69	0,67	0,69	0,70

Результаты решения многокритериальной задачи оптимизации характеристик судна, полученные с использованием рассмотренных выше методов, представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Результаты многокритериальной оптимизации**

Обозначение	Метод равномерной оптимальности	Метод справедливого компромисса	Аддитивная свертка				Метод идеальной точки
			$\alpha_1 = 0,50$ $\alpha_2 = 0,25$ $\alpha_3 = 0,25$	$\alpha_1 = 0,25$ $\alpha_2 = 0,50$ $\alpha_3 = 0,25$	$\alpha_1 = 0,25$ $\alpha_2 = 0,25$ $\alpha_3 = 0,50$	$\alpha_1 = 0,33$ $\alpha_2 = 0,33$ $\alpha_3 = 0,33$	
F*	0,139	1,842	0,214	0,016	0,010	0,046	0,537
TRC, долл./т.	14,32	16,92	14,79	14,52	14,90	14,32	14,53
I, млн. долл.	17,513	24,179	21,488	15,667	15,401	17,507	18,863
C, млн. долл.	8,029	11,261	9,573	7,338	7,497	8,025	8,642
Q, млн. т./год	0,561	0,665	0,647	0,505	0,503	0,560	0,595
DW, т	43442	55073	55699	36781	36563	43413	48034
N, кВт	6572	11866	8828	5675	6086	6564	7506
L, м	192,00	222,49	222,49	181,43	175,53	192	200,55
B, м	32,00	32,00	32,00	30,24	29,25	32,00	32,00
H, м	15,73	19,58	15,73	15,73	15,69	15,73	15,73
T, м	11,71	11,71	11,71	11,71	11,69	11,71	11,71
Vs, уз.	14,00	15,10	14,04	14,00	14,00	14,00	14,00
Cb	0,712	0,80	0,793	0,677	0,716	0,711	0,753

Анализ значений, приведенных в табл. 4, говорит о том, что методы равномерной оптимальности и аддитивной свертки (при равных значениях весовых коэффициентов  $\alpha_j$ ) дают близкие по значениям проектных характеристик и показателей

функциональной эффективности результаты. В обоих случаях получено минимальное значение показателя  $TRC$ , которое, тем не менее, на 2,0 % превышает значение критерия  $f_2$  в табл. 1.

Минимальное значение критерия  $f_3$ , полученное методом аддитивной свертки при  $\alpha = \{0,25, 0,50, 0,25\}$ , больше значения полученного при решении однокритериальной задачи поэтому же показателю на 12,7 %.

Максимальный грузооборот получен в результате применения метода справедливого компромисса, однако полученное значение на 7,3 % меньше соответствующего показателя в табл. 1 (критерий  $f_4$ ).

В результате применения метода идеальной точки для решения многокритериальной задачи получены осредненные по отношению к данным табл. 1 результаты.

Обобщая результаты выполненного исследования, можно сделать следующий вывод. Применение методов многокритериальной оптимизации позволяет лучше понять роль каждого из рассматриваемых частных критериев оптимальности и оценить степень их влияния на результаты оптимизации, характеризующиеся значениями проектных переменных и показателей функциональной эффективности судна. В результате поиска компромисса значения частных критериев оптимальности и других показателей функциональной эффективности судна будут отличаться от их оптимальных значений, полученных при однокритериальной оптимизации (как правило в худшую сторону). Т.е. увеличивая один показатель, мы уменьшаем другой. Попытка найти компромисс требует от ЛПР четкого понимания роли и важности каждого частного критерия оптимальности в задаче проектирования судна.

### **Заключение**

В статье рассмотрено применение методов одно- и многокритериальной оптимизации для решения задачи оптимизации проектных характеристик судна. Выполнен анализ влияния частных критериев оптимальности на значения проектных характеристик и элементов. Рассмотрено применение наиболее часто используемых методов многокритериальной оптимизации, выполнено сравнение результатов, полученных разными методами между собой и с результатами однокритериальной оптимизации. На численном примере показано, что в результате поиска компромисса значения частных критериев оптимальности изменяются и отличаются от их оптимальных значений, полученных при решении задачи однокритериальной оптимизации (как правило не в лучшую сторону). Применение методов многокритериальной оптимизации для решения задач проектирования судов позволяет лучше понять роль каждого частного критерия оптимальности и оценить степень его влияния на показатели функциональной эффективности и проектные характеристики судна. Наиболее полезными в этом плане являются методы, позволяющие учитывать и варьировать предпочтения ЛПР по отношению к частным критериям оптимальности.

### **Список литературы**

1. Бреслав Л.Б. Техничко-экономическое обоснование средств освоения Мирового океана. Л.: Судостроение, 1982. - 240 с.
2. Краев В.И. Экономическое обоснование при проектировании морских грузовых судов. Л.: Судостроение, 1981. -280 с.
3. Соколов В.П. Постановка задач экономического обоснования судов. Л.: Судостроение, 1987. 162 с.
4. Benford H. A naval architect's guide to practical economics. Department of naval architectute and marine engineering University of Michigan. 1991. 134 p.

5. Buxton I.L. Engineering economics and ship design. 3rd ed. (University of Newcastle upon Tyne, Dept of Marine Technology). BSRA, 1987, 143 p. <https://doi.org/10.1080/00137917208902718>.
6. Кини Р., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.
7. Подиновский В.В. Многокритериальные задачи принятия решений: теория и методы анализа: учебник для вузов. - Москва: Издательство Юрайт, 2022. — 486 с.
8. Rao S.S. Engineering optimization: theory and practice. 4th ed. – New York: Wiley, 2009. – 813 p.
9. Китаев М.В., Тюфтяев Д.В., Тортыжева Д.А. Математическая модель проектирования грузового судна // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 4 (53). С. 42-58. DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/42-58>
10. Царев В.В. Внутрифирменное планирование. - СПб.: Питер, 2002. - 496 с.
11. Кузин Б.И., Юрьев В.Н., Шахдинаров Г.М. Методы и модели управления фирмой. - СПб.: Питер, 2001. - 432 с.
12. Подиновский, В. В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. - Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2007. - 256 с.
13. Курицкий Б.Я. Оптимизация вокруг нас. - Л.: Машиностроение, 1989. - 144 с.

#### References

1. Breslav L.B. Tekhniko-ehkonomicheskoe obosnovanie sredstv osvoeniya Mirovogo okeana [Feasibility study of means for the development of ocean resources]. L.: Sudostroenie, 1982. 240 p. (In Russ).
2. Kraev V.I. Ehkonomicheskoe obosnovanie pri proektirovanii morskikh gruzovykh sudov [Economic substantiation for the design of marine cargo vessels]. L.: Sudostroenie, 1981. 280 p. (In Russ).
3. Sokolov V.P. Postanovka zadach ehkonomicheskogo obosnovaniya sudov [Statement of the problem of economic substantiation of vessels design]. L.: Sudostroenie, 1987. 162 p. (In Russ).
4. Benford H. A naval architect's guide to practical economics. Department of naval architecture and marine engineering University of Michigan. 1991. 134 p.
5. Buxton I.L. Engineering economics and ship design. 3rd ed. (University of Newcastle upon Tyne, Dept of Marine Technology). BSRA, 1987, 143 p. <https://doi.org/10.1080/00137917208902718>.
6. Kini R., Raifa KH. Prinyatie reshenii pri mnogikh kriteriyakh: predpochteniya i zameshcheniya [Decision making under many criteria: preferences and substitutions] / Per. s angl. M.: Radio i svyaz', 1981. 560 p.
7. Podinovskii, V.V. Mnogokriterial'nye zadachi prinyatiya reshenii: teoriya i metody analiza [Multicriteria decision-making problems: theory and methods of analysis]. - Moskva: Izdatel'stvo Yurait, 2022. 486 p. (In Russ).
8. Rao S.S. Engineering optimization: theory and practice. 4th ed. – New York: Wiley, 2009. – 813 p.
9. Kitaev M.V., Tyufyaev D.V., Tertyzheva D.A. Matematicheskaya model' proektirovaniya gruzovogo sudna [Mathematical model for cargo vessel design] Vestnik Inzhenernoi shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta. 2022. № 4 (53). pp. 42-58. (In Russ). DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/42-58>
10. Tsarev V.V. Vnutrifirmennoe planirovanie [Intracompany planning]. - SPb.: Piter, 2002. 496 p. (In Russ).
11. Kuzin B.I., Yur'ev V.N., Shakhdinarov G.M. Metody i modeli upravleniya firmoi [Methods and models of firm management]. - SPb: Piter, 2001. 432 p. (In Russ).
12. Podinovskii V.V. Pareto-optimal'nye resheniya mnogokriterial'nykh zadach [Pareto-optimal solutions to multiobjective problems]. - Moskva: FIZMATLIT, 2007. 256 p. (In Russ).
13. Kuritskii B.YA. Optimizatsiya vokrug nas [Optimization is all around us]. - L.: Mashinostroenie, 1989. 144 p. (In Russ).

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Китаев Максим Владимирович**, к.т.н., доцент, департамент Морской техники и транспорта, Политехнический институт (Школа), Дальневосточный федеральный университет (ФГАОУ ВО «ДФУ»), 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс-10, E-mail: kitaev.mv@dvfu.ru

**Maksim V. Kitaev**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, department of Marine Engineering and Transport, Polytechnic Institute (School), Far Eastern Federal University, 10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, 690922

**Новосельцев Игорь Александрович**, аспирант, ассистент департамента Морской техники и транспорта, Политехнический институт (Школа), Дальневосточный федеральный университет (ФГАОУ ВО «ДФУ»), 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс-10, e-mail: novoseltcev.ia@dvfu.ru

**Igor A. Novoseltcev**, postgraduate student, assistant of the department of Marine Engineering and Transport, Polytechnic Institute (School), Far Eastern Federal University, 10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, 690922

Статья поступила в редакцию 09.02.2023; опубликована онлайн 20.06.2023.  
Received 09.02.2023; published online 20.06.2023.

УДК 629.12

DOI: 10.37890/jwt.vi75.363

## **Расчет нагрузки масс пассажирского речного тримарана в задачах исследовательского проектирования**

**А.Э. Корепанов**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0894-0799>

**Е.П. Роннов**

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

**Аннотация.** В статье приводится методика расчета нагрузки масс для определения водоизмещения пассажирских судов-тримаранов на начальных стадиях проектирования. Состояние данного вопроса на сегодня недостаточно изучено, т.к. нет методики, позволяющей рассчитать водоизмещение судна-тримарана. Областью исследования является проектирование судов, в частности проектирование пассажирских судов-тримаранов, а объектом является определение составляющих нагрузки масс для нахождения общего водоизмещения судна-тримарана. Приведено уравнение масс для пассажирских судов-тримаранов, статистические зависимости и аналитические формулы для нахождения составляющих этого уравнения. На основании сравнительного анализа судов-прототипов и проектируемых судов-тримаранов были получены удовлетворительные результаты, которые показали, что предлагаемая методика может быть использована для расчета водоизмещения судов данного типа на начальных стадиях проектирования.

**Ключевые слова:** судно-тримаран, аутригеры, катамаран, нагрузка масс, водоизмещение, уравнение масс, статистические зависимости, мидель-шпангоут, модули и измерители масс.

## **Calculation of the mass load of a passenger river trimaran in research design problems**

**Alexey E. Korepanov**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0894-0799>

**Evgeniy P. Ronnov**

*<sup>1</sup>Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** The article presents a method for calculating the mass load for determining the displacement of passenger trimaran vessels at the initial stages of design. The state of this issue has not been sufficiently studied today, since there is no methodology that allows calculating the displacement of a trimaran vessel. The field of research is the design of vessels, in particular the design of passenger trimaran vessels, and the purpose is to determine the components of the mass load to determine the total displacement of the trimaran vessel. The equations of masses for trimaran passenger ships and statistical dependencies are given, as well as analytical formulas for finding the components of this equation. On the basis of a comparative analysis of prototype vessels and projected trimaran vessels, satisfactory results were obtained, which showed that the proposed methodology can be used to calculate the displacement of vessels of this type at the initial stages of design.

**Keywords:** trimaran vessel, outriggers, catamaran, mass load, displacement, mass equation, statistical dependencies, midship frame, modules and mass meters.

## Введение

Одной из основных и сложных задач, возникающих при обосновании любого судна, в том числе и пассажирских судов-тримаранов, является максимально достоверное определение водоизмещения. Расчет укрупненной нагрузки масс на этом этапе во многом базируется на статистических зависимостях [1-4]. Несмотря на большой интерес и интенсивность развития судов-тримаранов, особенно в зарубежной практике, методика расчета их нагрузки масс на начальных стадиях проектирования практически отсутствует. Это связано с тем, что в настоящее время используемые на этой стадии эмпирические зависимости для судов-тримаранов внутреннего и смешанного (река-море) плавания в силу недостаточной статистической базы отсутствуют.

В этих условиях предпринята попытка разработать методику расчета водоизмещения тримарана, используя, где возможно, данные по скоростным отечественным катамаранам, а также непосредственно прямой расчет некоторых масс.

## Методы и результаты

Полное водоизмещение судна-тримарана определяется из уравнения баланса масс [1, 2]:

$$D = D_{\text{пор}} + DW \quad (1)$$

где,  $D_{\text{пор}}$  – водоизмещение порожнем;  
 $DW$  – дедвейт.

Водоизмещение порожнем  $D_{\text{пор}}$  в соответствии с ОСТ 5Р.0206-2002 с учетом того, что некоторые относительно небольшие по массе разделы объединены, можно представить в виде суммы следующих составляющих:

$$D_{\text{пор}} = \sum_{i=1}^7 P_i + \Delta D \quad (2)$$

где,  $P_1$  – корпус;  
 $P_2$  – масса судовых устройств;  
 $P_3$  – масса судовых систем;  
 $P_4$  – масса судовой энергетической установки;  
 $P_5$  – масса электро-радио оборудования;  
 $P_6$  – масса постоянных жидких грузов;  
 $P_7$  – масса снабжения и имущества;  
 $\Delta D$  – запас водоизмещения.

В раздел «корпус» кроме массы металлического корпуса входят дельные вещи, неметаллические части корпуса, покрытие, окраска, изоляция, оборудование помещений. Они на начальных стадиях проектирования условно могут быть включены в другие разделы, определяемые одинаковым модулем.

Относительная доля составляющих уравнения (2) примерно такая же, как и у пассажирских катамаранов [5]. Так, в составе полного водоизмещения отечественных пассажирских судов-катамаранов среднее значение массы металлического корпуса с надстройкой занимает не менее 40-45% (в том числе металлический корпус (23-33%), масса судовых устройств 5-13%, масса судовых систем 4-8%, масса судовой энергетической установки и вспомогательных механизмов 9-15%, масса электро-радио оборудования 2-8%, постоянные жидкие грузы 1-2%, снабжение и имущество 1-2%, запас водоизмещения 2-5%, дедвейт 15-25%. Можно предположить, что массы  $P_2$ - $P_7$  для тримарана и катамарана практически не зависят от их конструктивных типов корпуса и могут быть определены на основании статистических зависимостей этих масс, полученных на базе судов-катамаранов, представленных в таблице 1. Численный анализ зависимостей измерителей масс (кроме масс  $P_1$  и  $P_4$ ) от ряда

модулей показал, что наивысшие показатели корреляции имеют место при модуле  $(LBH)^{2/3}$ , который был использован в дальнейших исследованиях. Модуль массы  $P_4$  на основании аналогичных выводов принят в виде  $N^{2/3}$ .

Таблица 1

**Разделы нагрузки масс пассажирских судов катамаранов и тримаранов**

Проект	Раздел нагрузки масс *, т					
	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$
HSC150B	14,417	3,595	-	7,913	1,348	3,6
L1100	7,323	3,329	-	7,05	1,076	2
P104	6,28	5,37	-	4,08	1,41	2,6
939	16,06	14,85	-	6,38	2,96	3,8
P80	56,42	29,83	-	14,32	8,05	7,56
P132	9,02	7,76	-	5,41	1,25	1,5
Super Speed	-	-	49,96	-	-	-
Benchijigua	-	-	313	-	-	-
Condor Liberation	-	-	243,3	-	-	-
Queen Beetle	-	-	154,64	-	-	-
Auto Express 118 - Bajamar Express	-	-	316,4	-	-	-
Tri swath	-	-	12,5	-	-	-

\* – обозначение разделов нагрузки масс см. формулу (2).

Результаты расчета измерителя масс  $\Psi_i$  выполненные с использованием пакета STATISTICA 10, приведены в таблице 2.

Таблица 2

**Значение модуля и измерителя масс судов-прототипов**

Проект	Значения измерителей масс $\Psi_i$						Значения модулей	
	$\Psi_2$	$\Psi_3$	$\Psi_4$	$\Psi_5$	$\Psi_6$	$\Psi_7$	$LBH^{2/3}$	$Ne^{2/3}$
HSC150B	0,136	0,034	-	0,075	0,013	0,034	105,63	-
L1100	0,070	0,032	-	0,068	0,010	0,019	104,05	-
P104	0,065	0,055	-	0,042	0,014	0,027	97,27	-
939	0,129	0,119	-	0,051	0,024	0,030	124,97	-
P80	0,238	0,126	-	0,060	0,034	0,032	237,05	-
P132	0,114	0,098	-	0,068	0,016	0,019	79,47	-
Super Speed	-	-	0,137	-	-	-	-	364,54

Benchijigua	-	-	0,305	-	-	-	-	1024,67
Condor Liberation	-	-	0,268	-	-	-	-	906,65
Queen Beetle	-	-	0,216	-	-	-	-	717,02
Auto Express 118 - Bajamar Express	-	-	0,309	-	-	-	-	1024,67
Tri swath	-	-	0,084	-	-	-	-	147,97

Измеритель массы  $i$ -ой составляющей нагрузки рассчитывается по формуле:

$$\Psi_i = P_i / M_i \quad (3)$$

где,  $P_i$  – масса  $i$ -ой составляющей нагрузки судна-прототипа;

$M_i$  – модуль судна-прототипа.

Используя представленные статистические данные, получены следующие эмпирические зависимости (см. таблицу 3).

Таблица 3

Эмпирические зависимости для расчета масс  $P_2$ - $P_7$

Наименование $i$ -й массы	Расчетная формула	Коэффициент детерминации	Критерий Фишера
Масса судовых устройств	$P_2 = 0,329 \times (LBH)^{2/3} - 22,78$	0,95	99,8
Масса судовых систем	$P_3 = 0,168 \times (LBH)^{2/3} - 10,12$	0,83	26,2
Масса судовой энергетической установки	$P_4 = 0,352 \times Ne^{2/3} - 63,94$	0,96	121,5
Масса электро-радио оборудования	$P_5 = 0,059 \times (LBH)^{2/3} + 0,17$	0,84	28,7
Масса постоянных жидких грузов	$P_6 = 0,047 \times (LBH)^{2/3} - 3,18$	0,96	123,8
Масса снабжения и имущества	$P_7 = 0,037 \times LBH^{2/3} - 1,11$	0,92	63,4

**Масса металлического корпуса с надстройкой.** В разделе **корпус** основная доля (до 75%) приходится на массу металлического корпуса. На стадиях исследовательского проектирования она определяется по эмпирическим формулам с использованием того или иного вида модулей, широко представленных в литературе [2, 3]. Однако отсутствие достаточной статистической базы по спроектированным судам-тримаранам исключает такой подход и оставляет только путь разработки виртуальной математической модели требуемой конструкции корпуса с постатейным расчетом масс его элементов. Учитывая, что корпус тримарана состоит из центрального корпуса, двух боковых – аутригеров, соединяющего их моста и надстройки, математическая модель должна отражать эти три составляющие, сумма масс которых составит искомую массу металлического корпуса:

$$P_1 = P_{1,c} + 2 \times P_{1,a} + 2 \times P_{1,m} + P_{1,n} \quad (4)$$

где,  $P_{1,c}$  – масса металла центрального корпуса тримарана;

$P_{1,a}$  – масса металла аутригера;

$P_{1,m}$  – масса металла моста, соединяющего центральный корпус и аутригер;

$P_{1,n}$  – масса металла надстройки.

Математическая модель расчета массы, например центрального корпуса  $P_{1,c}$  в общем случае имеет следующий вид:

$$P_{1,c} = \sum P_{i,c} \quad (5)$$

$$P_{i,c} = f(\bar{P}_{ijc}, n_{ijc}, Q_{ijc}, S, U) \quad (6)$$

$$F(S, U) > [F(S, U)]_{\text{доп}} \quad (7)$$

где,  $P_{i,c}$  –  $i$ -я составляющая масс металла центрального корпуса (масса наружной обшивки, палуб и платформ, переборок и т.д.), т;

$\bar{P}_{ijc}$  – масса  $j$ -го элемента  $i$ -ой составляющей массы центрального корпуса продольных и поперечных рамных и холостых связей, кницы, распорки и т.д.;

$n_{ijc}$  – количество  $j$ -х элементов  $i$ -ой составляющей масс;

$Q_{ijc}$  – вектор характеристик  $j$ -го элемента (размеры элемента, свойства материала и т.п.);

$S$  – вектор проектных элементов и характеристик судна (главные размерения, мощность главных двигателей, шпация, класс Российского Классификационного Общества (далее РКО) и т.д.);

$U$  – вектор нормативных требований РКО;

$F(S, U)$  – суммарная площадь поперечного сечения продольных связей отдельно палубного и днищевое пояса эквивалентного бруса. Это условие принимается в связи с ограничением длины судна в 50 метров и менее.

В целом приведенная математическая модель расчета массы металлического корпуса является заключительной частью общей модели, включающей в себя аналитическое представление судовой поверхности, расстановку поперечных переборок, поперечных и продольных рамных и холостых связей с определением их количества, геометрических размеров, толщины наружной обшивки, палуб и платформ, второго дна и их массы.

Учитывая, что отношение  $L/V$  центрального корпуса и особенно аутригеров, много больше, чем у традиционных водоизмещающих судов, и что бы без необходимости не усложнять виртуальную модель судовой поверхности на данной стадии, были приняты клинообразные обводы в оконечностях, вертикальный борт и плоское днище при минимальном радиусе скулы.

При принятой системе набора деление на отсеки корпуса выполнялось из условия требуемого РКО [6] минимального числа поперечных переборок, размеров нормируемых отсеков, длины машинного отделения (далее МО). Длину МО судна-тримарана определяем по статистической зависимости по формуле:

$$L_{\text{мо}} = L \times 0,246 + 2,848 \quad (8)$$

При получении данной регрессионной формулы: коэффициент детерминации составил  $R^2_{\text{скор}} = 0,92 > 0,7$ ; критерий Фишера  $F(1,4) = 58$ ;  $p = 0,0016 < 0,05$ ; показатель Шапира-Уилка  $p = 0,19 > 0,05$ .

Для получения статистической зависимости (8) были взяты суда-тримараны, такие как: Super Speed, Benchijigua, Condor Liberation, Queen Beetle, Auto Express 118, Tri Swath.

При получении длины МО более 12 метров по формуле (8), его необходимо разделить на два непроницаемых отсека.

Длина топливного отсека, расположенного по ширине судна, принята равной четырем шпациям. Длину коффердама, отделяющего топливный отсек от других отсеков, принимаем равным двум шпациям. Горизонтальный коффердам устанавливается под надстройкой в верхней части топливного отсека и имеет высоту 0,9 м.

Общая длина сухих трюмов находится вычитанием из длины судна  $L$  суммы ранее назначенных длин всех отсеков. Длина одного трюма определяется делением

общей полученной длины полезных трюмов на их число. В районе цилиндрической вставки в целях унификации длина трюмов (отсеков) принята одинаковой, кратной рамной шпации.

При конструировании связей для расчета количества различных шпангоутов корпус по длине разделяется на носовую оконечность, среднюю часть, район машинного отделения, и кормовую часть [7].

Толщины наружной обшивки, палуб и переборок принимались как минимально необходимые по требованию Правил [6].

Размеры балок холостого и рамного набора определялись с учетом выполнения требований [6] к минимальному значению момента сопротивления соответствующих балок.

Масса наружной обшивки, палуб, второго дна определялись по их фактической площади и средней толщине поясов.

Аналогичный подход использовался при расчете массы металлического корпуса аутригера и моста. Масса металла надстройки определялась исходя из ее размеров, которые принимались в зависимости от численности пассажиров по работе [8], и материала наружных стенок и переборок.

По изложенной модели был разработан алгоритм и компьютерная реализация процедуры расчета массы металлического корпуса пассажирского тримарана на языке программирования Visual Basic. Тестовые расчеты показали адекватность принятой математической модели.

В таблице 4 приведен сравнительный анализ существующих судов-тримаранов с проектируемыми судами аналогичных размеров.

Таблица 4

**Сравнительный анализ судов-тримаранов**

Расчетные величины	Вариант первый		Вариант второй	
	Судно прототип	Проектируемое судно	Судно прототип	Проектируемое судно
Название судна	Super Speed	-	Queen Beetle	-
Фото		-		-
$L_{н}$	54,5	54,5	83,5	83,5
$L_{КВЛ} = L_{ц.к.}, м$	52,1	52,1	79,6	79,6
$B_{КВЛ}, м$	15	15	20,2	20,2
$H, м$	5,5	5,5	6,3	6,3
$T_{КВЛ}, м$	2,1	2,1	2,4	2,4
$L_{аут}, м$	31,3	31,3	36,8	36,8
$B_{ц.к.}, м$	4,5	4,5	8,3	8,3
$B_{аут}, м$	1,1	1,1	0,8	0,8

$T_{аут}$ , м	1	1	0,8	0,8
$n_{нас}$ , чел	473	473	502	502
$n_{эк}$ , чел	8	8	20	20
$v$ , км/ч	55	-	68	-
$N_e$ , кВт	3x2320	3x2320	4x4800	4x4800
$D_{пор}$ , т	316	327	690	718
$\frac{\delta D_{пор} =  D_{пор} - D'_{пор} }{D'_{пор} / (D_{пор} - D'_{пор} / \min)} \times 100\%$	3,5%		4%	
$D'_{пор}$ – водоизмещение порожнем проектируемого судна.				

Из таблицы 4 видно, что погрешность водоизмещения порожнем проектируемого судна от судна Super Speed составляет 3,5%, а для судна Queen Beetle составляет 4%, что находится в диапазон от 2% до 5% запаса водоизмещения, вследствие чего может быть учтено правильным выбором запаса водоизмещения.

#### Заключение

Предложенные статистические зависимости для расчета основных составляющих нагрузки масс и процедура расчета масс металлического корпуса, основанная на постатейном расчете по виртуальной модели конструкции корпуса и надстройки, составляют методику расчета водоизмещения речного пассажирского судна-тримарана.

Выполненные тестовые расчеты и анализ их результатов позволяют сделать вывод о том, что предлагаемая методика может быть использована для расчета нагрузки масс на стадии исследовательского проектирования рассматриваемого типа судов.

#### Список литературы

1. Ашик В. В. Проектирование судов. Ленинград.: Издательство «Судостроение». 1985. 320 с.
2. Роннов Е. П. Проектирование судов внутреннего плавания. Нижний Новгород.: Издательство ФГОУ ВПО «ВГАВТ». 2009. 288 с.
3. Егоров Г.А. Определение весовой нагрузки судов смешанного «река-море» плавания нового поколения в начальной стадии проектирования. Морской вестник № 4(48), 2013, с 19-22.
4. Бронников А.В. Проектирование судов. Л.: Судостроение, 1991. 320 с.
5. Алферьев М.Я., Мадорский Г.С. Транспортные катамараны внутреннего плавания. М., «Транспорт», 1976. 336с.
6. Правила классификации и постройки судов Часть 1 «Корпус и его оборудование». Москва, «Российское Классификационное Общество», 2019. 192 с.
7. Протопопов В.Б., Свечников О.И., Егоров Н.М. Конструкция корпуса судов внутреннего и смешанного плавания. Л.: Судостроение, 1984. 376 с.
8. Корепанов А.Э., Роннов Е.П. Обоснование главных размерений тримарана из условия пассажироместимости в задачах исследовательского проектирования, Научные проблемы водного транспорта, 2022, №70 (1), с 39-47.

### References

1. Ashik V. V. Proektirovanie sudov [Ship design]. Leningrad.: Izdatel'stvo «SudostroeniE». 1985. 320 s.
2. Ronnov E. P. Proektirovanie sudov vnutrennego plavaniya [Design of inland navigation vessels]. Nizhny Novgorod.: Izdatel'stvo FGOU VPO «VGAVT». 2009. 288 s.
3. Egorov G.A. Opredelenie vesovoi nagruzki sudov smeshannogo «reka-more» plavaniya novogo pokoleniya v nachal'noi stadii proektirovaniya [Determination of the weight load of vessels of mixed "river-sea" navigation of a new generation at the initial design stage], Morskoi vestnik [Marine Bulletin], no. 4(48), 2013, pp. 19-22.
4. Bronnikov A.V. Proektirovanie sudov [Ship design]. L.: Sudostroenie, 1991. 320 s.
5. Alfer'ev M.YA., Madorskii G.S. Transportnye katamarany vnutrennego plavaniya [Inland transport catamarans]. M., «Transport», 1976. 336s.
6. Pravila klassifikatsii i postrojki sudov Chast' 1 «Korpus i ego oborudovanie». Moskva, «Rossijskoe Klassifikatsionnoe Obshchestvo», 2019. 192 s.
7. Protopopov V.B., Svechnikov O.I., Egorov N.M. Konstruktsiya korpusa sudov vnutrennego i smeshannogo plavaniya [Construction of the hull of inland and mixed navigation vessels.]. L.: Sudostroenie, 1984. 376 s.
8. Korepanov A.EH., Ronnov E.P. Obosnovanie glavnykh razmerenii trimarana iz usloviya passazhirovmestimosti v zadachakh issledovatel'skogo proektirovaniya [Substantiation of the main dimensions of the trimaran from the passenger capacity condition in research design tasks], Nauchnye problemy vodnogo transporta [Scientific problems of water transport], 2022, №70 (1), pp. 39-47.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Корепанов Алексей Эдуардович**, аспирант, Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, Россия, e-mail: a.e.korepanov@yandex.ru

**Alexey E. Korepanov**, graduate student, Volga State University of Water Transport, 603951, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5, Russian Federation, e-mail: a.e.korepanov@yandex.ru

**Роннов Евгений Павлович**, д.т.н., профессор, заведующий кафедры проектирования и технологии постройки судов, Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, Россия, e-mail: eronnov@mail.ru

**Evgeniy P. Ronnov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Shipbuilding Design and Technology Department, Volga State University of Water Transport, 603951, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5, Russian Federation, e-mail: eronnov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 02.02.2023; опубликована онлайн 20.06.2023.  
Received 02.02.2023; published online 20.06.2023.

УДК 629.5:620.197.5

DOI: 10.37890/jwt.vi372

## **Исследования микроскопии поверхностного слоя стали в районе переменной ватерлинии судов и океанотехнических объектов**

**В.А. Крамарь**

*ORCID: 0000-0002-0528-1978*

**А.В. Родькина**

*ORCID: 0000-0002-4593-4259*

**О.А. Иванова**

*ORCID: 0000-0002-3034-0968*

**В.Р. Душко**

*ORCID: 0000-0001-9265-9512*

*Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия*

**Аннотация.** Авторами статьи описаны исследования поверхностного слоя стали для условий непрерывного погружения в модельный раствор морской воды и района переменной ватерлинии судов и океанотехнических объектов. Результаты микроскопии показали существенную разницу в структуре и составе поверхностного слоя в зависимости от экспериментальных условий. Дальнейшее изучение полученного элементного состава и снимков микроскопии позволит разработать методику компьютерного анализа данных на основе системы технического зрения или с применением интеллектуальных подходов для прогнозирования потенциала судостроительных сталей на различных этапах воздействия морской воды с целью совершенствования методов защиты от коррозии.

**Ключевые слова:** коррозионно-механические разрушения, переменная ватерлиния, микроскопия, океанотехнические объекты.

## **Microscopy studies of the surface layer of steel in the area of variable waterline of vessels and ocean technical facilities**

**Vadim V. Kramar**

*ORCID: 0000-0002-0528-1978*

**Anna V. Rodkina**

*ORCID: 0000-0002-4593-4259*

**Olga A. Ivanova**

*ORCID: 0000-0002-3034-0968*

**Veronika R. Dushko**

*ORCID: 0000-0001-9265-9512*

*Sevastopol State University, Sevastopol, Russia*

**Abstract.** The authors of the article describe the study of the surface layer of steel for the conditions of continuous immersion in a model solution of sea water and the area of variable waterline of ships and ocean technical facilities. The results of microscopy showed a significant difference in the structure and composition of the surface layer depending on the experimental conditions. Further study of the obtained elemental composition and microscopy images will make it possible to develop a method for computer analysis of data based on a vision system or using intelligent approaches to predict the potential of shipbuilding steels at various stages of exposure to sea water in order to improve corrosion protection methods.

**Keywords:** corrosion-mechanical damage, splash area, microscopy, ocean technical facilities.

### **Введение**

Развитие высокотехнологичной судостроительной отрасли предусматривается Государственной программой Российской Федерации «Развитие судостроения и техники для освоения шельфовых месторождений» и обеспечивается разработкой новых технологий и проектов гражданской морской техники. Также, до 2030 года одним из приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации, который позволит получить научные и научно-технические результаты и создать технологии, являющиеся основой инновационного развития внутреннего рынка продуктов и услуг, устойчивого положения России на внешнем рынке, является переход, в частности, к новым материалам и способам конструирования.

Проблема коррозии в целом не является новой, но в настоящее время во всех промышленных странах непрерывно растет потребность ее решения [1]. Защита судов от коррозии продолжает оставаться актуальной, так как темпы коррозии оказывают влияние на прочность корпуса и возможность его эксплуатации [2]. Однако наиболее подвержен коррозии район периодического смачивания или район переменной ватерлинии. Коррозийное воздействие может приводить не только к повреждению корпуса судна и океанотехнических объектов, но и к нарушению в рассчитанном управлении из-за изменения их поверхности, что может повлечь за собой изменение их гидродинамических параметров и «плавности» обтекания корпуса при выполнении высокоточных технологических операций.

В морской воде на поверхности металла протекают два электродных процесса: окисление металла и восстановление окислителя, в большинстве случаев растворенного в воде кислорода. Анализ существующих видов дефектов наружной обшивки морских судов и океанотехнических объектов, образовавшихся в результате коррозии показал, что скорость ее протекания, как с внутренней, так и наружной стороны обшивки судна, составляет приблизительно 0,025–0,125 мм/год [3] в зависимости от условий, в которых эксплуатируется данное судно или океанотехническое сооружение, что соответствует равномерной поверхностной коррозии и не учитывает локальные дефекты [4].

Воздух, растворенный в морской воде, значительно ускоряет процесс коррозии, благодаря чему участки металлической конструкции, расположенные у поверхности воды, корродируют значительно сильнее, чем на глубине. Район периодического смачивания (район переменной ватерлинии) начинается несколько ниже среднего уровня малой воды и заканчивается над ним на высоте в 1,5–2 раза превышающей расстояние от этого уровня до отметки ее нижней границы. Диапазон простирается этого района зависит от приливо-отливных условий, номинальной высоты волны, а также от воздействия ледового покрова в условиях холодного климата.

Повышенное содержание кислорода в поверхностных слоях воды вызывает усиленную коррозию в области ватерлинии судов, на участках корпусов судов и океанотехнических объектов, находящихся близко у поверхности. На рис. 1 представлены особенности коррозионного воздействия среды в зависимости от окружающих условий на примере океанотехнического объекта – стационарной буровой установки [5].



Рис. 1. Районы коррозии и методы защиты от нее морских стационарных платформ:  
 1 – грунт; 2 – сваи; 3 – дно моря; 4 – аноды; 5 – опорное основание; 6 – морская вода;  
 7 – средний уровень морской воды; 8 – опоры палубы;  
 9 – модули верхнего строения; 10 – буровая вышка

Учитывая особенности района переменной ватерлинии необходимо детально изучить эффективность применяемых методов защиты, в частности, катодной защиты. Для выполнения данной задачи требуется создание специальной методики исследования процессов, происходящих на поверхности судостроительных сталей, находящихся в районе переменной ватерлинии. Рассмотрены методики исследования поверхности металлоконструкции [6–13]. По результатам их анализа можно сделать вывод, что исследование потенциала металлоконструкции производится во время фактического коррозионного процесса и требует затрат на моделирование необходимой коррозионной среды. Данные методики не позволяют моделировать и исследовать влияние условий среды района переменной ватерлинии на состояние стальных конструкций морских судов и океанотехнических объектов. Таким образом, требуется разработка методики исследования поверхностного слоя стали при непрерывном погружении и в районе переменной ватерлинии морских судов, и океанотехнических объектов.

Вышеизложенные положения определяют цель данной работы – исследование поверхностного слоя стали в районе переменной ватерлинии судов и океанотехнических объектов, которая позволит разработать методику исследования потенциала судостроительных сталей на различных этапах воздействия морской воды на район переменной ватерлинии, в том числе при катодной поляризации.

### Исследование поверхностного слоя

Для выполнения поставленной цели были проведены исследования судостроительной конструкционной легированной стали на универсальном

настольном сканирующем электронном микроскопе Phenom ProX согласно рекомендациям, изложенным в паспортной документации [14], на специально подготовленном образце (рис. 2), изготовленный в соответствии с требованиями [15].

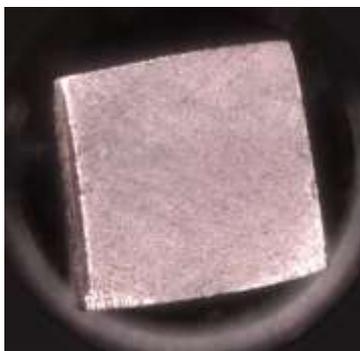


Рис. 2. Образец судостроительной стали

Для определения элементного состава в точке использовался встроенный программный пакет Element Identification. Исследования каждого образца проводились в пяти масштабах увеличения (100, 1000, 2000, 5000, 10000) и в трех-пяти точках различных монохромных оттенков полученных снимков. При проведении микроскопии после исследования коррозионных процессов района переменной ватерлинии количество применяемых масштабов и точек было изменено в случае невозможности получения четкого изображения при высоком уровне увеличения. По итогам каждого эксперимента сохранялась информация о спектре материала в каждой точке (рис. 3), изображение образца, полученное с помощью детектора обратнорассеянных электронов (рис. 4), и изображение, содержащее информацию обо всех элементах (рис. 5). На рисунках 3–5 показан один из результатов исследования поверхностного слоя чистого образца судостроительной стали.

Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.
Fe	46.33	71.27
O	36.54	16.10
Al	14.26	10.60
Si	1.43	1.11
Cr	0.41	0.58

Рис. 3. Информация о спектре материала

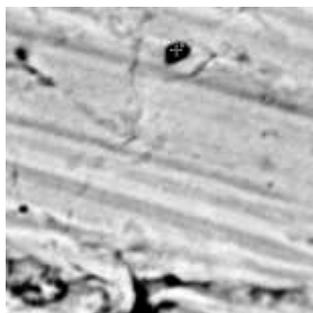


Рис. 4. Изображение образца

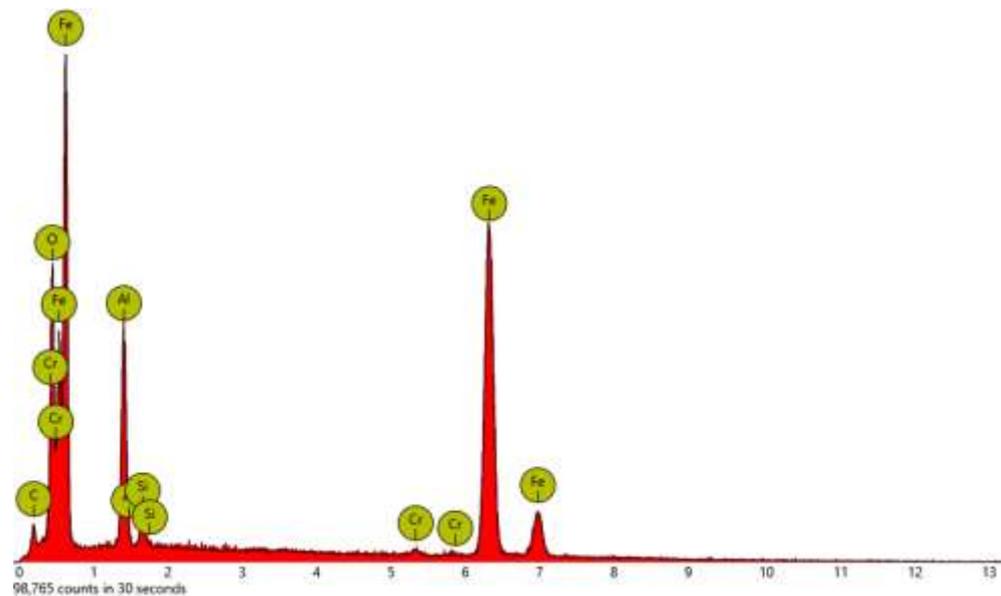


Рис. 5. Элементный состав

### Результаты микроскопии

Микроскопия проводилась для образцов в экспериментальных условиях:

- чистого образца;
- непрерывного погружения в модельный раствор морской воды;
- района переменной ватерлинии морских судов и океанотехнических объектов.

Изображения поверхностного слоя чистого образца судостроительной стали (рис. 4) – четкие. В ходе анализа элементного состава в исследованных точках выявлены зависимости между цветовой характеристикой точки (в градациях серого) и элементным составом, которые могут позволить оценить марку стали и возможные дефекты поверхностного слоя. Данные результаты микроскопии чистого образца особо важны для оценки изменения состояния поверхностного слоя после исследования в условиях непрерывного погружения образца и в условиях района переменной ватерлинии.

Для исследования коррозионных процессов района переменной ватерлинии были изучены климатические особенности приливов, отливов и волнения для февраля месяца [16] Штормового газоконденсатного месторождения (44°55'03.1"N 31°42'55.8"E), крупнейшего действующего морского месторождения в Черном море [17], где эксплуатируются океанотехнические объекты – самоподъемная плавучая буровая установка «Сиваш», морская стационарная платформа МСП-17 и др.

Для требуемых координат были получены данные Гидрометцентра [18] на основе карты (рис. 6), где цветом обозначена высота преобладающих волн (м) и стрелками показано среднее направление распространения волн (только для областей с высотой волн более 5 см), учитывая, что отдельные волны могут превышать приводимые значения.

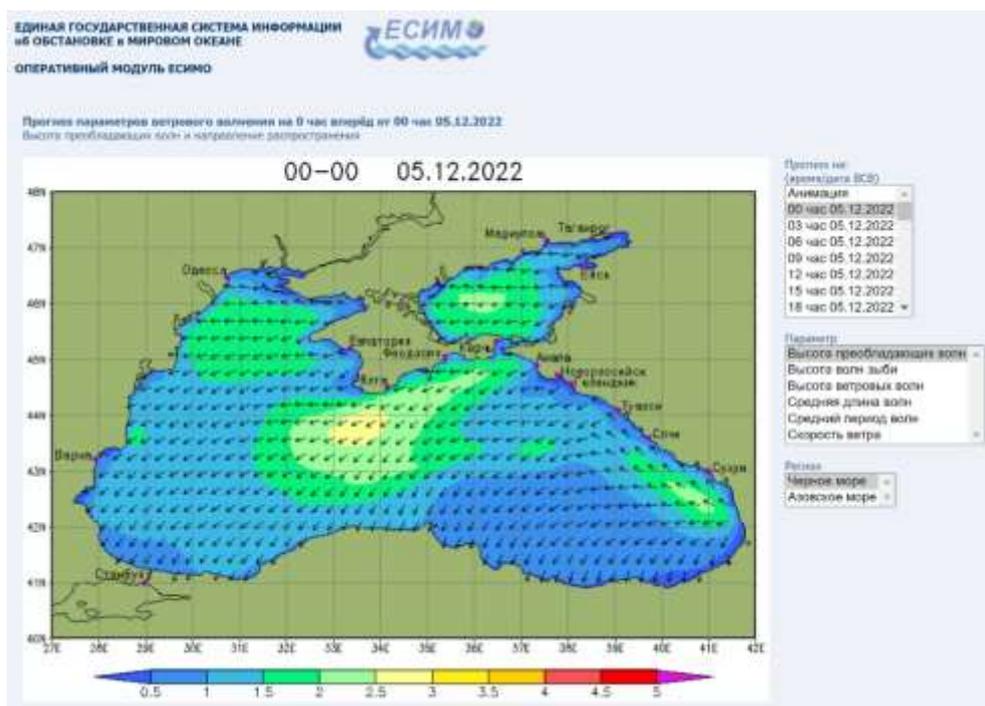


Рис. 6. Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане

Определено, что периодичность волнения в данный период времени составляет порядка 48 часов, соответственно, для исследования района переменной ватерлинии в лабораторных условиях образец погружался в модельный раствор морской воды каждые 48 часов, затем 48 часов находился в атмосферных условиях. При проведении манипуляций с образцом обязательно отслеживалась сохранность рабочей стороны образца исключая любые контакты с инструментами.

Для определения высоты района переменной ватерлинии из полученных значений наиболее информативна преобладающая высота волн. Значения фиксировались каждые 3 часа (табл. 1), что позволяет прогностическая система Гидрометцентра.

Таблица 1

Высота преобладающих волн

Время, час	14.06.2022	10.07.2022	28.08.2022	09.09.2022	21.10.2022	23.11.2022
0	1	0,5	0,5	0,5	2	0,5
3	1	2,5	0,5	0,5	1,5	1
6	0,5	2,5	0,5	0,5	1,5	1,5
9	1	2,5	0,5	1	1	2
12	0,5	2,5	0,5	1	1	2,5
15	0,5	2	0,5	1	0,5	2,5
18	1	1,5	0,5	1,5	0,5	3
21	1	1	0,5	1,5	0,5	2,5

Затем определялась максимальная высота волны за день и на основе этих данных были построены ежемесячные гистограммы (рис. 7).



Рис. 7. Максимальные высоты волны

На основе проанализированного временного периода июнь 2022 г. – ноябрь 2022 г. максимальная высота волны наблюдается в августе, октябре и ноябре от 1 до 5 дней, не более 17 % месяца. Следует учитывать, что высоты волн равные 0,0 м не предполагают полного штиля, возможно появление волн зыби. Таким образом была определена высота района переменной ватерлинии, на примере МСП-17, установленной в Черном море.

Фото результата исследования условий непрерывного погружения в модельный раствор морской воды представлено на рис. 8 (а). Фото результата исследования условий района переменной ватерлинии представлено на рис. 9 (а). Результаты микроскопии отражены на рис. 8 (б), 9 (б).

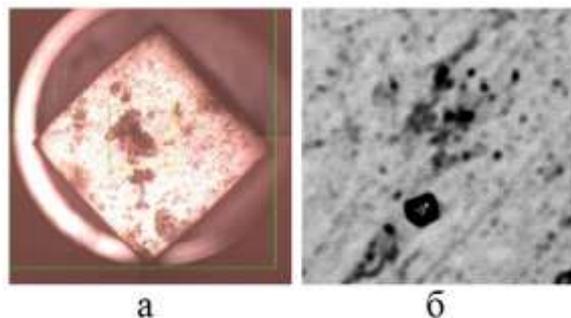


Рис. 8. Образец и результат микроскопии образца судостроительной стали после непрерывного погружения в модельный раствор морской воды

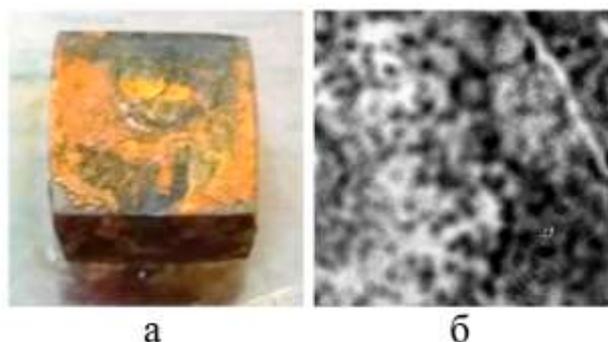


Рис. 9. Образец и результат микроскопии образца судостроительной стали после эксперимента в условиях района переменной ватерлинии

Изображения поверхностного слоя образца судостроительной стали, моделирующего состояние стали в подводной части, и после исследования в условиях района переменной ватерлинии имеют менее четкие границы между градациями серого, однако палитра более разнообразна. Проведенная микроскопия позволила выявить разницу качественного и количественного элементного состава полученного в ходе эксперимента поверхностного слоя, образующегося в результате взаимодействия стали с морской водой и влажной окружающей средой (экспериментальные условия района переменной ватерлинии). Исследование обусловленного влияния изменения количественного состава поверхностного слоя в зависимости от условий эксплуатации района корпуса (непрерывного погружения в морскую воду и района переменной ватерлинии) позволит усовершенствовать методики предотвращения коррозионных разрушений корпусных конструкций морских судов и океанотехнических объектов.

### **Заключение**

Впервые проведены исследования микроскопии поверхностного слоя стали по определению элементного состава в лабораторных условиях, аналогичных району переменной ватерлинии судов и океанотехнических объектов. Результаты позволяют определить зависимости между цветовой характеристикой точки (в градациях серого) и элементным составом, что дает возможность оценить возможные дефекты поверхностного слоя и район расположения исследуемой области относительно ватерлинии. Изучение полученного элементного состава и снимков микроскопии определяет перспективу дальнейших исследований, а именно – разработку методики компьютерного анализа данных на основе системы технического зрения или с применением интеллектуальных подходов с целью создания способа защиты морских судов и океанотехнических объектов в районе переменной ватерлинии, особенностью которого является использование специального анодного узла как защитного элемента, работающего на основе построения прогнозных оценок защитного потенциала с помощью нейросетевого моделирования для точного выбора защитного потенциала с учетом ювенильной поверхности. Применение данного способа защиты позволит снизить скорость коррозионно-механических разрушений корпусных конструкций морских судов и плавучих технических сооружений, проектируемых для Черноморского бассейна и эксплуатирующихся в этом регионе. При наличии данных о климатических особенностях приливов, отливов и волнения возможно применение данного способа для объектов, эксплуатирующихся в любой точке мирового океана.

**Список литературы**

1. Киршина А.А., Багерман А.З., Киршин А.Ю., Князьков М.Л., Левихин А.А. Сравнительная оценка эксплуатационных характеристик (окисление, коррозия) порошковых и литейных сплавов // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. №2(384). С. 81–86.
2. Rodkina A., Kramar V., Ivanova O. Computer Assisted Data Analysis for Predicting the Protective Potential of Hull Structures of Ships and Floating Facilities // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Volume 1333, 2. 032069. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1333/3/032069>
3. Семенова И.В., Флорианович Г.М., Хорошилов А.В. Коррозия и защита от коррозии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 336 с.
4. Kramar V., Rodkina A., Ivanova O., Chernyi S., Zinchenko A. Analysis Technology and Cathodic Protection for Hull Structures of Ships and Floating Facilities // Inventions 2021, 6, 74. DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions6040074>
5. Бабей Ю.И., Сопрунок Н.Г. Защита стали от коррозионно-механического разрушения. Киев: Техника, 1981. 126 с.
6. Ожиганов Ю.Г. Коррозионная усталость металлов, применяемых в судовом машиностроении. Севастополь, 1980, 391 с.
7. Пат. 2 533 344 Российская Федерация, Установка для электрохимического исследования коррозии металлов, Перельгин Ю.П., Розен А.Е., Киреев С.Ю., Лось И.С., Панин М.Ю.; № 2013131950, заявл.09.07.2013, опубл. 20.11.2014, Бюл. № 32.
8. Пат. 2 634 800 Российская Федерация, Способ определения порога напряжений коррозионного растрескивания стали или сплава при постоянной деформации, Батаев С.В., Береснева И.А., Дербышев А.С., Ефимов А.Н., Жолудь А.С., Крицкий А.А., Ладыгин Ф.А., Мельников В.В., Чинейкин С.В., Шипулин С.А., АО «Чепецкий механический завод»; № 2016145747; заяв. 22.11.2016, опубл. 03.11.2017, Бюл. № 31.
9. Pat. 101762453 China, Accelerated test method of inbuilt electrode simulating non-uniform corrosion of steel bar in concrete, Jin Weiliang, Xia Jin, Wang Hailong, Zhejiang University ZJU, № 2010100396903; prior. 15.01.2010, publ. 30.06.2010.
10. Pat. 204116137 China, A kind of electrochemical corrosion test fixture loading tension for petroleum pipeline, Fu Anqing, Xie Junfeng, Shanguan Fengshou, Wang Tongfeng, Liu Zhengdong, Li Fagen, Cai Rui, Zhao Xuehui, Yin Chengxian, Bai Zhenquan, China National Petroleum Corp, CNPC Tubular Goods Research Institute, № 201420620656; prior. 24.10.2014, publ. 21.01.2015.
11. Pat. 104849198, China, A kind of erosion-corrosion experimental provision for simulating waves splash about area, Zhao Weimin, Zhang Ti Ming, Wang Yong, Sun Jianbo, China University of Petroleum UPC East China, № 201510257018; prior. 15.05.2015, publ. 26.09.2017.
12. Пат. 2 379 655 Российская Федерация, Способ контроля коррозионной стойкости углеродистых и низколегированных сталей и изделий из них, Реформатарская И.И., Бегишев И.Р., Нисельсон Л.А., Подобаев А.Н., Ащеулова И.И., НИФХИ им. Л.Я. Карлова; № 2008126165; заяв. 27.06.2008, опубл. 20.01.2010, Бюл. № 2.
13. Пат. 2 695 961 Российская Федерация, МПК G 01 N 17/02. Комплекс для исследования электрохимических характеристик корпусных конструкций судов и плавучих технических сооружений, Родкина А.В., Иванова О.А., Душко В.Р., Крамарь В.А.; № 2018134086, заявл. 26.09.2018, опубл. 29.07.2019, Бюл. № 22.
14. Электронный микроскоп Thermo Fisher Scientific Phenom ProX. URL: <https://pharma-se.ru/products/nastolnye-elektronnye-mikroskopy/elektronnyu-mikroskop-thermo-fisher-scientific-phenom-prox/> (дата обращения 01.08.2022).
15. Гуляев А.П. Металловедение. М.: Металлургия, 1986. 647 с.
16. Справочных данных по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2006.
17. Государственное унитарное предприятие Республики Крым «Черноморнефтегаз». URL: <http://gas.crimea.ru/> (дата обращения 01.08.2022).
18. Единая государственная система информации об обстановке в мировом океане. Прогноз параметров ветрового волнения. URL: [http://193.7.160.230/web/esimo/black/wwwf/wwwf\\_black.php](http://193.7.160.230/web/esimo/black/wwwf/wwwf_black.php) (дата обращения 01.08.2022).

### References

1. Kirshina A.A., Bagerman A.Z., Kirshin A.Yu., Knyazkov M.L., Levikhin A.A. Sravnitel'naya otsenka ekspluatatsionnykh kharakteristik (okisleniye, korroziya) poroshkovykh i liteynykh splavov [Comparative assessment of performance parameters (oxidation, corrosion) of powder and cast alloys]. Transactions of the Krylov State Research Centre 2018, no 2(384). pp. 81–86. (In Russ).
2. Rodkina A., Kramar V., Ivanova O. Computer Assisted Data Analysis for Predicting the Protective Potential of Hull Structures of Ships and Floating Facilities. Journal of Physics: Conference Series 1333, 2. 032069. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1333/3/032069>
3. Semenova I.V., Florianovich G.M., Khoroshilov A.V. Korroziya i zashchita ot korrozii [Corrosion and corrosion protection]. M.: FIZMATLIT, 2002. 336 p. (In Russ).
4. Kramar V., Rodkina A., Ivanova O., Chernyi S., Zinchenko A. Analysis Technology and Cathodic Protection for Hull Structures of Ships and Floating Facilities. Inventions 6(4). 74. DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions6040074>
5. Babey Yu.I., Soprunyuk N.G. Zashchita stali ot korrozionno-mekhanicheskogo razrusheniya [Protection of steel from corrosion-mechanical destruction]. Kyiv: Technique, 1981. 126 p. (In Russ).
6. Ozhiganov Yu.G. Corosionaya ustalost metallov, primenyaemih v sudovom mashinostroenii [Corrosion fatigue of metals used in marine engineering]. Sevastopol, 1980, 391 s.
7. Pat. 2 533 344 Rossiyskaya Federatsiya, Ustanovka dlya elektrohimicheskogo issledovaniya korrozii metallov [Installation for electrochemical survey of metal corrosion]. Perelygin Yu.P., Rozen A.E., Kireev S.Yu., Los' I.S., Panin M.Yu.; № 2013131950, zayavl. 09.07.2013, opubl. 20.11.2014, Byul. № 32.
8. Pat. 2 634 800 Rossiyskaya Federatsiya, Sposob opredeleniya poroga napryazhenij korrozionnogo rastreskivaniya stali ili splava pri postoyannoj deformacii [Method for definition of threshold of stresses of corrosion treatment of steel or alloy under constant deformation]. Bataev S.V., Beresneva I.A., Derbyshev A.S., Efimov A.N., Zholid' A.S., Krickij A.A., Ladygin F.A., Mel'nikov V.V., Chinejkin S.V., Shipulin S.A., AO «Chepeckij mekhanicheskij zavod»; № 2016145747; zayavl. 22.11.2016, opubl. 03.11.2017, Byul. № 31.
9. Pat. 101762453 China, Accelerated test method of inbuilt electrode simulating non-uniform corrosion of steel bar in concrete, Jin Weiliang, Xia Jin, Wang Hailong, Zhejiang University ZJU, № 2010100396903; prior. 15.01.2010, publ. 30.06.2010.
10. Pat. 204116137 China, A kind of electrochemical corrosion test fixture loading tension for petroleum pipeline, Fu Anqing, Xie Junfeng, Shanguan Fengshou, Wang Tongfeng, Liu Zhengdong, Li Fagen, Cai Rui, Zhao Xuehui, Yin Chengxian, Bai Zhenquan, China National Petroleum Corp, CNPC Tubular Goods Research Institute, № 201420620656; prior. 24.10.2014, publ. 21.01.2015.
11. Pat. 104849198, China, A kind of erosion-corrosion experimental provision for simulating waves splash about area, Zhao Weimin, Zhang Ti Ming, Wang Yong, Sun Jianbo, China University of Petroleum UPC East China, № 201510257018; prior. 15.05.2015, publ. 26.09.2017.
12. Pat. 2 379 655 Rossiyskaya Federatsiya, Sposob kontrolya korrozionnoj stojkosti uglerodistykh i nizkolegirovannykh stalej i izdelij iz nih [Method of monitoring corrosion resistance of carbon- and low-alloyed steel and objects made from said steel]. Reformatarskaya I.I., Begishev I.R., Nisel'son L.A., Podobaev A.N., Ashcheulova I.I., NIFH im. L.Ya. Karpova; № 2008126165; zayavl. 27.06.2008, opubl. 20.01.2010, Byul. № 2.
13. Pat. 2 695 961 Rossiyskaya Federatsiya, MPK G 01 N 17/02. Kompleks dlya issledovaniya elektrokhimicheskikh kharakteristik korpusnykh konstruktсий sudov i plavuchikh tekhnicheskikh sooruzheniy [Complex for electrochemical characteristics research of vessels and floating technical structures hull structures]. Rodkina A.V., Ivanova O.A., Dushko V.R., Kramar V.A.; № 2018134086, zayavl. 26.09.2018, opubl. 29.07.2019, Byul. № 22.
14. Elektronnyy mikroskop Thermo Fisher Scientific Phenom ProX [Electron microscope Thermo Fisher Scientific Phenom ProX]. Available at: <<https://pharmase.ru/products/nastolnye-elektronnye-mikroskopy/elektronnyy-mikroskop-thermo-fisher-scientific-phenom-prox/>> (accessed 01.08.2022).
15. Gulyaev A.P. Metallovedeniye [Metal science]. Moscow: Metallurgy, 1986. 647 p. (In Russ).

16. Spravochnyykh dannykh po rezhimu vetra i volneniya Baltiyskogo, Severnogo, Chernogo, Azovskogo i Sredizemnogo morey [Reference data on the wind and wave regime of the Baltic, North, Black, Azov and Mediterranean seas]. SPb.: Russian Maritime Register of Shipping, 2006. 450 p. (In Russ).
17. Gosudarstvennoye unitarnoye predpriyatiye Respubliki Krym «Chernomorneftegaz» [State Unitary Enterprise of the Republic of Crimea "Chernomorneftegaz"]. Available at: <<http://gas.crimea.ru/component/content/article/23-novosti/69-karta>> (accessed 01.08.2022).
18. Yedinaya gosudarstvennaya sistema informatsii ob obstanovke v mirovom okeane. Prognoz parametrov vetrovogo volneniya [Unified state information system about the situation in the world ocean. Forecast of wind wave parameters]. Available at: <[http://193.7.160.230/web/esimo/black/wwf/wwf\\_black.php](http://193.7.160.230/web/esimo/black/wwf/wwf_black.php)> (accessed 01.08.2022).

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Крамарь Вадим Александрович**, д-р техн. наук, профессор кафедры «Информатика и управление в технических системах» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: vakramar@sevsu.ru

**Родькина Анна Владимировна**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Инновационное судостроение и технологии освоения шельфа» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: a.v.rodkina@mail.ru

**Иванова Ольга Александровна**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Океанотехника и кораблестроение» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: o.a.ivanova.kmt@mail.ru

**Душко Вероника Ростиславовна**, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Инновационное судостроение и технологии освоения шельфа» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: v.r.dushko@mail.ru

**Vadim A., Kramar**, D.Sc.(Tech.), Professor of the Department of Informatics and Control in Technical Systems, Sevastopol State University, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053

**Anna V. Rodkina** Ph.D. in Engineering Science, Assistant Professor of the Department of Innovative shipbuilding and shelf development technologies, Sevastopol State University, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053

**Olga A. Ivanova**, Ph.D. in Engineering Science, Assistant Professor of the Department of Ocean Technology and Shipbuilding, Sevastopol State University, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053

**Veronika R. Dushko**, Ph.D. in Engineering Science, assistant professor, head of the Department of Innovative shipbuilding and shelf development technologies, Sevastopol State University, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053

Статья поступила в редакцию 05.04.2023; опубликована онлайн 20.06.2023.  
Received 05.04.2023; published online 20.06.2023.

УДК 620.179.1

DOI: 10.37890/jwt.vi75.382

## **Влияние пластической деформации на структуру и свойства стали 20ХГСА, полученной методом аддитивного электродугового выращивания**

**А.А. Хлыбов<sup>1</sup>**

**Д.А. Рябов<sup>1</sup>**

**А.А. Соловьев<sup>1</sup>**

**М.С. Аносов<sup>1</sup>**

**Ю.И. Матвеев<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup>*Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия*

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования влияния степени деформации при одноосном растяжении на структуру и физико-механические свойства стали 20ХГСА, полученной методом 3D-печати электродуговой наплавкой.

Показано, что аддитивные технологии производства материалов и изделий получили широкое распространение. В частности, технологии электродугового выращивания (WAAM метод) представляют особый интерес. Несомненным достоинством метода WAAM является относительно малая стоимость оборудования и наплавляемого материала (в сравнении с лазерным или электронно-лучевым оборудованием), а также возможность получения крупногабаритных заготовок с наименьшим количеством дефектов. Проведен сравнительный анализ влияния направления наплавки на свойства образцов при механических испытаниях. Установлено, что деструктуризация материала происходит более интенсивно в образце, вырезанном перпендикулярно направлению наплавки. Предложены неразрушающие способы оценки деформированного состояния стали 20ХГСА при одноосном растяжении. Показано, что одним из наиболее чувствительных неразрушающих методов оценки деформированного состояния металлических материалов является ультразвуковой эхо-импульсный метод контроля, который является полезным количественным инструментом для контроля состояния материала благодаря своей простоте и надежности. Высокой чувствительностью к деформациям обладает магнитный метод контроля. Показана зависимость магнитных свойств металлов (в частности, коэрцитивной силы  $H_c$ ) от степени деформации материала.

**Ключевые слова:** 3D-печать металлами, микроструктура, ультразвуковой контроль, магнитный контроль, деформация.

## **The effect of plastic deformation on the structure and properties of 20CRMNSI steel obtained by additive electric arc cultivation**

**A.A. Khlybov<sup>1</sup>**

**D.A. Ryabov<sup>1</sup>**

**A.A. Solovyov<sup>1</sup>**

**M.S. Anosov<sup>1</sup>**

**Yu.I. Matveev<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Nizhny Novgorod State Technical University R.E. Alekseeva, Nizhny Novgorod, Russia*

<sup>2</sup>*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** The paper presents the results of a study of the influence of the degree of deformation under uniaxial tension on the structure and physico-mechanical properties of

20KHGSA steel obtained by 3D printing by electric arc surfacing. It is shown that additive technologies for the production of materials and products have become widespread. In particular, the technologies of electric arc cultivation (WAAM method) are of particular interest. The undoubted advantage of the WAAM method is the relatively low cost of equipment and surfaced material (in comparison with laser or electron beam equipment), as well as the possibility of obtaining large-sized blanks with the least number of defects. A comparative analysis of the influence of the direction of surfacing on the properties of samples during mechanical tests is carried out. It is established that the destruction of the material occurs more intensively in the sample cut perpendicular to the direction of surfacing. Non-destructive methods for estimating the deformed state of 20KHGSA steel under uniaxial tension are proposed. It is shown that one of the most sensitive non-destructive methods for assessing the deformed state of metallic materials is the ultrasonic echo-pulse control method, which is a useful quantitative tool for monitoring the state of the material due to its simplicity and reliability. The magnetic control method has a high sensitivity to deformations. The dependence of the magnetic properties of metals (in particular, the coercive force  $H_c$ ) on the degree of deformation of the material is shown.

**Keywords:** 3D printing with metals, microstructure, ultrasonic inspection, magnetic inspection, deformation.

### **Введение**

В настоящее время активно развиваются экспериментальные и промышленные аддитивные технологии производства материалов и изделий [1-4]. Среди существующих вариантов аддитивных технологий электродуговое выращивание (WAAM метод) представляет особый интерес [3, 4]. Это обусловлено уникальными технологическими возможностями получения заготовок сложных форм и возможностью восстанавливать изношенные компоненты конструкций [5].

Выращивание металлических слоев и изготовление объемных деталей различной геометрической формы осуществляется за счет наплавления проволоки [3]. Несомненным достоинством метода WAAM является относительно малая стоимость оборудования и наплавляемого материала (в сравнении с лазерным или электронно-лучевым оборудованием), а также возможность получения крупногабаритных заготовок с наименьшим количеством дефектов [6].

Несмотря на наличие большого количества исследований, посвящённых технологиям WAAM производства, структура и физико-механические свойства различных конструкционных материалов изучены недостаточно. В частности, нет достоверных сведений о влиянии пластической деформации на структуру и механические свойства получаемых изделий из стали 20ХГСА. Выбор данной стали связан с ее широким применением в машиностроении.

Известно, что одним из наиболее чувствительных неразрушающих методов оценки деформированного состояния металлических материалов является ультразвуковой эхо-импульсный метод контроля, который является полезным количественным инструментом для контроля состояния материала [7, 8] благодаря своей простоте и надежности. Высокой чувствительностью к деформациям обладает также магнитный метод контроля. Зависимость магнитных свойств металлов (в частности, коэрцитивной силы  $H_c$ ) от степени деформации материала была показана в ряде работ [9, 10, 11, 12] и признана надежным и информативным методом контроля состояния материала. Именно поэтому в качестве информативных параметров в настоящей работе были выбраны ультразвуковой и магнитный методы контроля.

Для оценки повреждения поверхности целесообразно использовать металлографический метод, поскольку он позволяет непосредственно наблюдать изменения микроструктуры, которые можно оценить количественно [13, 14].

**Материалы и методы исследования**

В качестве материала для исследования была выбрана конструкционная сталь 20ХГСА. Химический состав данного сплава приведен в табл. 1. Образцы для исследования были получены на специальном стенде для 3D-печати электродуговой наплавкой на станке с ЧПУ в среде защитного газа (20% Ar + 80% CO<sub>2</sub>) [15].

Таблица 1

**Химический состав стали 20ХГСА, мас. %**

Марка	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
20ХГСА	0,21	0,85	0,78	0,02	0,01	0,89	0,01	0,1	ост.

Для оценки влияния направления наплавки на свойства стали 20ХГСА из выращенной стенки вырезали пропорциональные плоские образцы с сечением 10x5 мм для испытаний на растяжение (ГОСТ 1497-84) вдоль и поперек направления наплавки. Растяжение образцов проводили на разрывной силовой машине УМЭ-10ТМ, оборудованной цифровыми интеллектуальными датчиками силы и перемещения от ZETLAB, при скорости нагружения 5 мм/мин при T = 20°C.

Растяжение исследуемых образцов проводили в несколько этапов. Каждый этап включал в себя растяжение образца до заданного значения деформации. После деформирования образцы подвергали изучению, используя различные методы контроля (исследование микроструктуры с привязкой по геометрии зоны контроля, измерение микротвердости, ультразвуковой и магнитный контроль).

В точке проведения контроля микроструктуры после каждого этапа нагружения измеряли скорости распространения упругих волн в м/с по формуле (1).

$$C_i = \frac{2h}{\tau_i}, \tag{1}$$

где *h* – толщина образца, м;  $\tau_i$  – время распространения ультразвуковых импульсов, с.

Для измерения времени распространения ультразвуковых (УЗ) импульсов использовался акустический измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) «АСТРОН». Для измерения использовались сдвиговые и продольные с частотой 5 МГц, а также волны Рэлея с частотой 5 МГц.

По полученным скоростям распространения УЗ волн рассчитывался акустический диагностический параметр Dc (формула (2)), который используется для оценки степени структурной деградации материала [11, 16, 17]:

$$Dc = \frac{C_t^{\parallel} + C_t^{\perp}}{C_l}, \tag{2}$$

где  $C_t^{\parallel}$ , м/с – скорость распространения сдвиговой волны с поляризацией вдоль образца;  $C_t^{\perp}$ , м/с – скорость распространения сдвиговой волны с поляризацией поперек образца;  $C_l$ , м/с – скорость распространения продольной волны.

Использование параметра Dc позволяет исключать из исследования толщину контролируемого материала, что является особенно актуальным при проведении измерений на конструкциях, где измерение толщины невозможно.

Для описания анизотропии упругих свойств образцов в процессе поэтапного пластического деформирования пользовались параметром, величина которого определяется с помощью объемных ультразвуковых волн, формула (3):

$$A = \frac{2(C_t^{\parallel} - C_t^{\perp})}{(C_t^{\parallel} + C_t^{\perp})} \tag{3}$$

Использование параметра акустической анизотропии также позволяет исключить из исследования толщину образцов.

Для определения величины коэрцитивной силы  $H_c$  использовали магнитный анализатор МА-412ММ. База для измерений, соответствующая расстоянию между контактными площадками – 30 мм. Измерения проводили не менее 5 раз с точной геометрической привязкой к исследуемой зоне.

В качестве информационного параметра структурной деградации также использовали микротвердость. Измерения проводили на микротвердомере ИТВ-1-АМ при нагрузке 1 кгс.

Металлографический анализ образцов проводили по стандартной схеме: шлифовка, полировка и последующее травление в 4%-ом растворе азотной кислоты в течение 10-15 с. Изображения микроструктур после каждого этапа деформирования получали с применением оптического металлографического микроскопа «KEYENCE VHX-1000».

**Экспериментальные исследования. Анализ экспериментальных исследований.**

По результатам статических механических испытаний были определены значения прочностных и пластических характеристик исследуемого материала (табл. 2).

*Таблица 2*

**Значения прочностных и пластических характеристик исследуемого материала**

Направление вырезки	$\delta$ , %	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа
Вдоль	26,5	481	699
Поперек	21,4	451	678

После определения основных механических характеристик было проведено испытание на поэтапное одноосное растяжение. По результатам эксперимента была получена зависимость предела текучести исследуемых образцов от степени деформации (рис. 1).

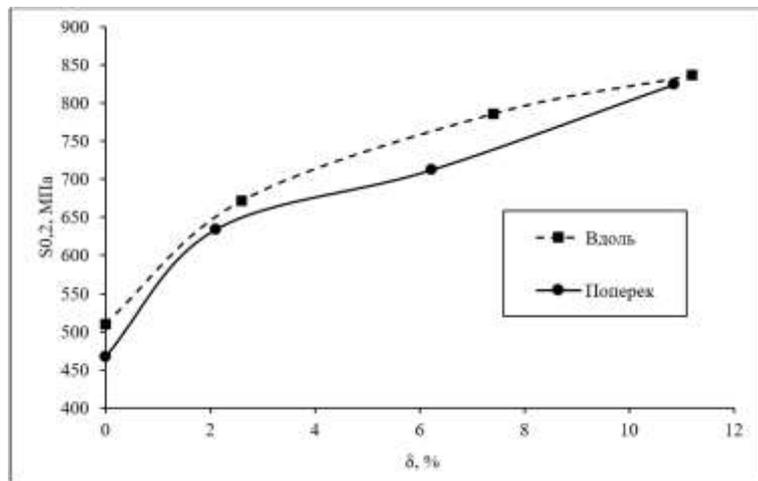


Рис. 1. Зависимость предела текучести при растяжении от значений относительного удлинения

Эксперимент показал, что образец, полученный путем 3D-печати и вырезанный в продольном направлении относительно наплавки имеет большее значение предела текучести ( $S_{0,2}$ ) и деформируется на большую величину ( $\delta$ ) по сравнению с образцом, вырезанным поперек направления наплавки.

Эволюция микроструктуры образцов, полученных методом WAAM из стали 20ХГ и вырезанных вдоль и поперек направления наплавки, представлены на рис. 2 и рис. 3 соответственно.

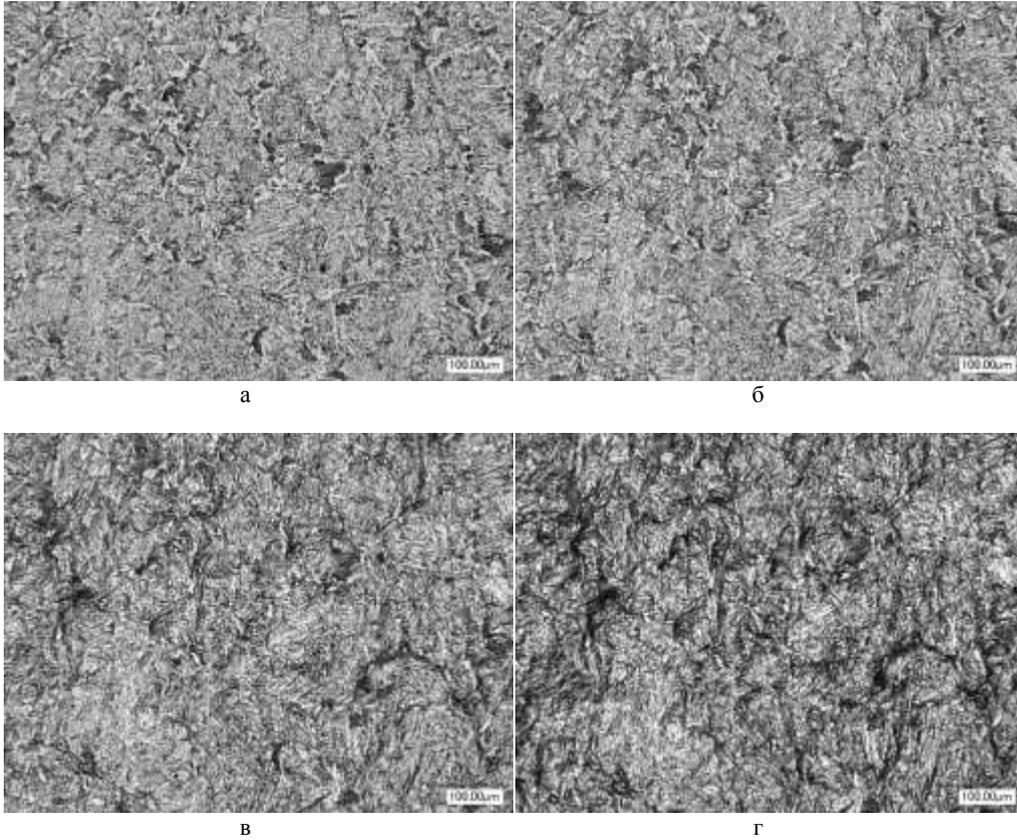
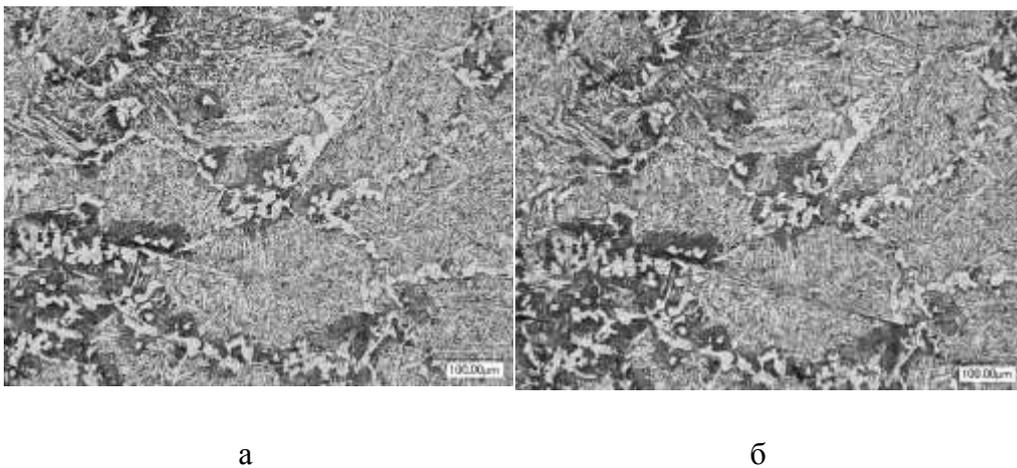
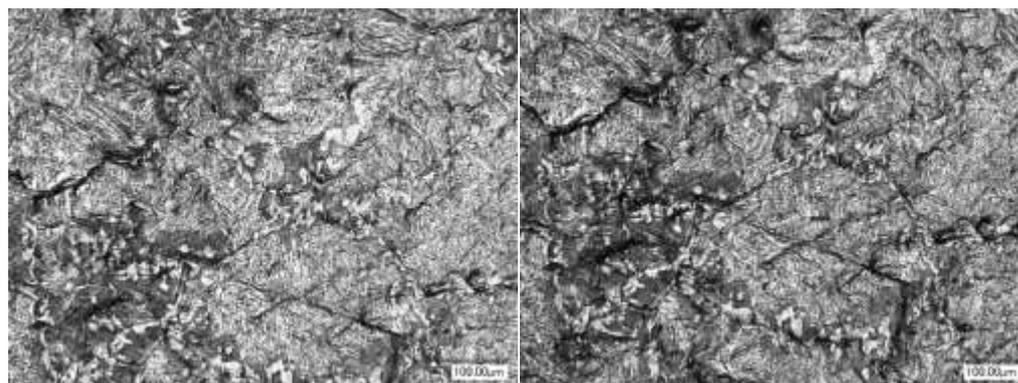


Рис. 2. Структурные изменения продольно-вырезанного образца из стали 20ХГСА в процессе поэтапного растяжения (x500):

а – относительное удлинение 0%; б – относительное удлинение 2,6%; в – относительное удлинение 7,4%; г – относительное удлинение 11,2





В

Г

Рис. 3. Структурные изменения поперечно-вырезанного образца из стали 20ХГСА в процессе поэтапного растяжения (x500):

а – относительное удлинение 0%; б – относительное удлинение 2,1; в – относительное удлинение 6,23%; г – относительное удлинение 10,86%

Анализ представленных микроструктур после поэтапного растяжения показал, что уже на начальных этапах деформирования наблюдается появление большого количества устойчивых полос скольжения в отдельных зернах феррита в виде тонких линий. При пластической деформации энергия расходуется не только на накопление микродефектов, но и на формирование текстуры деформации, то есть происходит стесненный поворот и фрагментация зерен. Вдоль грубых полос скольжения, представляющих собой экструзии, образуются интрузии – микротрещины, которые являются источником макротрещин, образующихся на поверхности и в приповерхностном слое порядка нескольких размеров зерен, что особенно заметно на образце, вырезанном поперек направления наплавки (рис. 3в, г).

В ходе исследования был проведен анализ микротвердости образцов из стали 20ХГСА, полученных методом WAAM. Результаты замеров приведены на рис. 4.

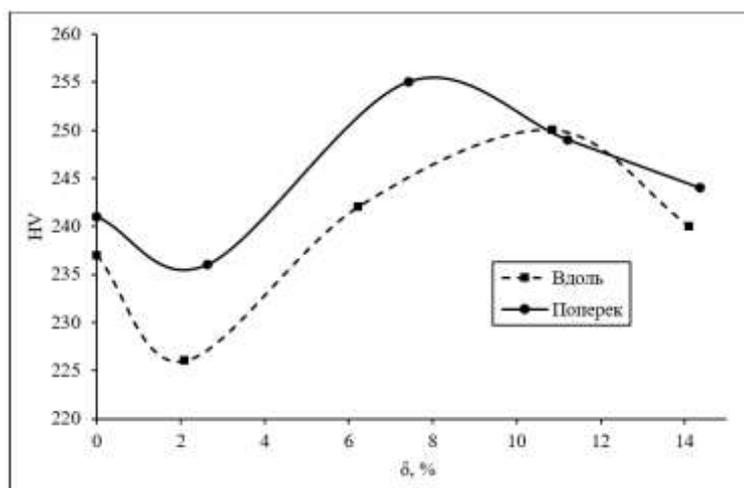


Рис. 4. Зависимость микротвердости образцов из стали 20ХГСА от степени деформации

В ходе эксперимента было установлено, что микротвердость образцов, вырезанных вдоль и поперек направления наплавки, изменяется схожим образом. Снижение твердости на начальных этапах деформирования связано с компенсацией сжимающих структурных и термических напряжений, которые возникли при наплавке образцов по методу WAAM. Дальнейшее увеличение твердости связано с интенсификацией деформационных процессов (значительный наклеп и повышение плотности дислокаций). При достижении степени деформации свыше 8% для образца, вырезанного поперек направления наплавки, наблюдается монотонное снижение микротвердости, что говорит о начале разрушения материала образца. Начинают образовываться и развиваться системы микротрещин, которые приводят к скоплению несплошностей. При увеличении степени деформации несплошности начинают сливаться, что приводит к образованию макротрещин в объеме материала, что хорошо согласуется с микроструктурными исследованиями. Образец, вырезанный вдоль направления наплавки, ведет себя схожим образом. Микротвердость начинает снижаться при достижении степени деформации свыше 10%.

В результате исследований была установлена связь между параметрами ультразвуковых волн и степени деформации образцов из стали 20ХГ, полученных методом WAAM. Зависимость акустического параметра  $D_c$  от степени деформации образцов из стали 20ХГСА, вырезанных вдоль и поперек направления наплавки, представлена на рис. 5.

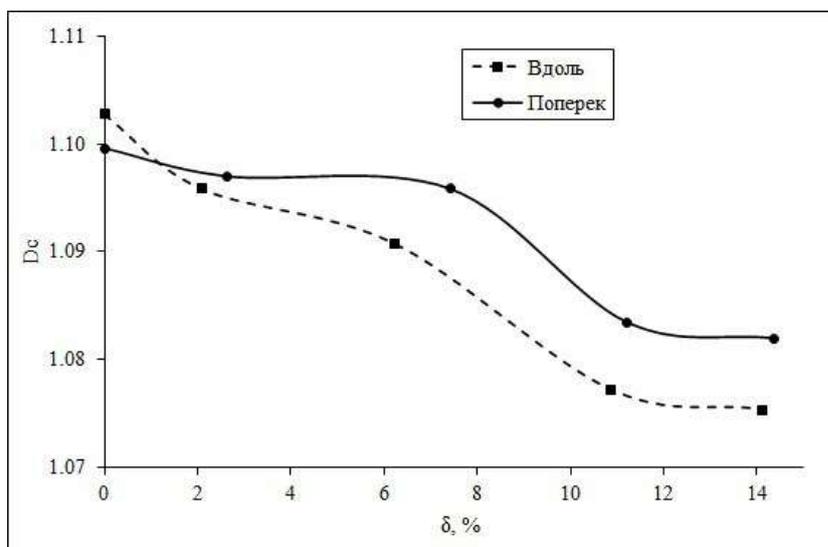


Рис. 5. Зависимость акустического параметра  $D_c$  от степени деформации образцов, изготовленных по методу WAAM

Анализируя приведенную зависимость акустического параметра  $D_c$ , можно сделать вывод, что при статическом нагружении образцов, вырезанных вдоль и поперек направления наплавки из стали 20ХГСА, наблюдается две стадии изменения значений  $D_c$ . До степени деформации  $\sim 11\%$  наблюдается снижение значений акустического параметра для обоих образцов. При этом для образца, вырезанного поперек направления наплавки, снижение  $D_c$  происходит более монотонно. Снижение параметра обусловлено интенсификацией появления и слиянием структурных дефектов. Такое поведение связано с развитием систем микротрещин при статическом нагружении образцов из стали 20ХГСА, что приводит к снижению скоростей упругих волн и параметр  $D_c$  начинает снижаться.

На рис. 6 представлена зависимость параметра акустической анизотропии  $A$  от степени деформации образцов из стали 20ХГСА.

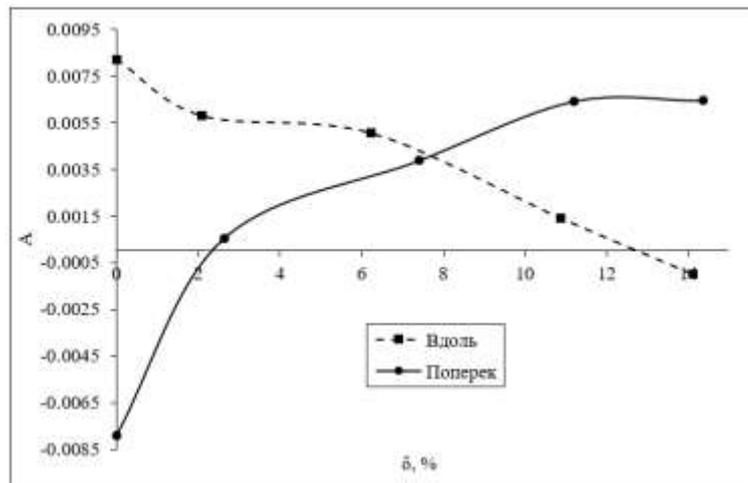


Рис. 6. Зависимость параметра акустической анизотропии от степени деформации образцов, изготовленных по методу WAAM

Полученная зависимость отражает чувствительность параметра акустической анизотропии к направлению наплавки образцов из стали 20ХГСА. При увеличении степени деформации образца, вырезанного поперек направления наплавки, происходит рост значений акустического параметра. Известно, что изменение параметра  $A$  связано с изменением кристаллографической текстуры в процессе деформирования. При одноосном растяжении наблюдается фрагментация и стесненный поворот зерен относительно приложенной нагрузки, что приводит к росту значений акустического параметра. При растяжении образца, вырезанного вдоль направления наплавки, наблюдается монотонное снижение параметра акустической анизотропии. Образование преимущественно ориентированных дефектов приводит к уменьшению параметра акустической анизотропии.

Рассмотрим влияние пластической деформации на коэрцитивную силу  $H_c$  образцов из стали 20ХГСА, вырезанных вдоль и поперек направления наплавки. Как видно на рис. 7, коэрцитивная сила образца, вырезанного вдоль направления наплавки, возрастает с увеличением степени деформации. Возрастание значений коэрцитивной силы  $H_c$  характеризуется затруднением протекания процесса намагничивания и перемагничивания. Причинами возрастания значений  $H_c$  являются повышение степени искаженности кристаллической решетки при поэтапном растяжении, а также явления наклепа, сопровождающегося увеличением плотности дефектов с более высокими значениями критических полей взаимодействия доменных границ с дефектами структуры сплава.

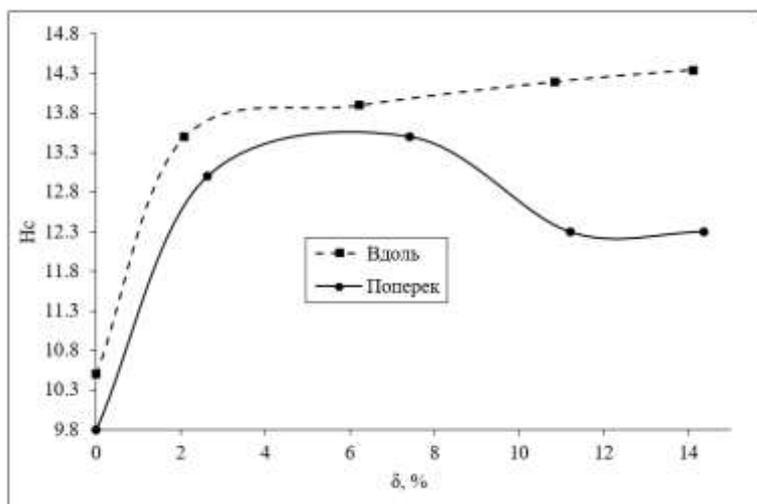


Рис. 7. Зависимость коэрцитивной Зависимость образцов из стали 20ХГСА, вырезанных вдоль и поперек направления наплавки

Коэрцитивная сила образца, вырезанного поперек направления наплавки до степени деформации ~6%, также возрастает по причинам, описанным выше. Однако дальнейшее увеличение степени деформации приводит к снижению значений коэрцитивной силы Hc. Это объясняется тем, что увеличение степени деформации в объеме материала приводит к образованию большого количества макротрещин, наступает разрушение образца и значение коэрцитивной силы снижаются.

Зависимость времени распространения рэлеевских (поверхностных) волн от степени деформации образцов стали 20ХГСА, вырезанных вдоль и поперек направления наплавки, представлена на рис. 8.

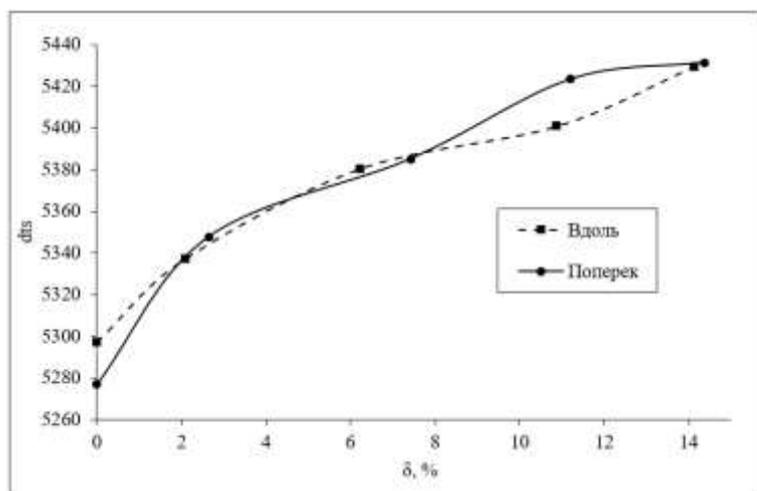


Рис. 8. Зависимость времени распространения рэлеевских волн от степени деформации образцов, изготовленных по методу WAAM

Описанная на рис. 8 зависимость характеризует чувствительность распространяющейся в образцах из стали 20ХГСА поверхностной волны к увеличению степени деформации. Повышение уровня структурных несовершенств (фрагментация и стесненный поворот зерен, микротрещины, рыхлости) приводит к

увеличению времени распространения акустического импульса в исследуемых поверхностных слоях. Изменение времени распространения такого типа волн в образцах из стали 20ХГСА, полученных по методу WAAM после поэтапного деформирования свидетельствует о возможности их применения для оценки и прогнозирования ресурса деталей и конструкций, изготовленных с помощью аддитивных технологий.

Таким образом, структурочувствительные акустические параметры  $D_s$ ,  $A$  и распространяющаяся в приповерхностном слое рэлеевская волна, а также значения коэрцитивной силы  $H_c$  могут быть применены в задачах диагностики преждевременного разрушения и мониторинга наиболее нагруженных зон конструкций из стали 20ХГСА, полученной методом WAAM.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-19-00332-П «Разработка научно-обоснованных подходов и аппаратно-программных средств мониторинга поврежденности конструкционных материалов на основе подходов искусственного интеллекта для обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов в Арктических условиях»

#### Список литературы

1. Herzog D., Additive manufacturing of metals / D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, C. Emmelmann // *Acta Mater.* – 2016. – Vol. 117. pp. 371-392. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
2. Жуков В.В., Аддитивное производство металлических изделий (обзор) / В.В. Жуков, Г.М. Григоренко, В.А. Шаповалов // *Автоматическая сварка.* – 2016. – № 5-6. – С. 148-153.
3. Wu B., A review of the wire arc additive manufacturing of metals: Properties, defects and quality improvement / B. Wu, Z. Pan, D. Ding, D. Cuiuri, H. Li, J. Xu, J. Norrish // *J. Manuf. Process.* – 2018. – Vol. 35. – Pp. 127-139. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001>
4. Ding D., Wire-feed additive manufacturing of metal components: Technologies, developments and future interests / D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2015. – Vol. 81. Pp. 465-481. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>
5. Исследование влияния режимов 3D-печати на структуру и хладостойкость стали 08Г2С / Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Рябов Д.А., Колчин П.В., Шатагин Д.А., Киселев А.В. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.* – 2021. – №4. – С. 64-70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-64-70>
6. Ron T., Environmental behavior of low carbon steel produced by a wire arc additive manufacturing process / T. Ron, G.K. Levy, O. Dolev, A. Leon, A. Shirizly, E. Aghion. *Metals.* – 2019. – Vol. 9. Pp. 888-900. <https://doi.org/10.3390/met9080888>
7. Szelążek J., New samples with artificial voids for ultrasonic investigation of material damage due to creep / J. Szelążek, S. Mackiewicz, Z. Kowalewski // *NDT & E Int.* – 2009. – Vol. 42. – Is. 2. Pp. 150-156. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2008.11.004>
8. Makowska K., Prediction of the mechanical properties of P91 steel by means of magneto-acoustic emission and acoustic birefringence / K. Makowska, L. Piotrowski, Z.L. Kowalewski // *Nondestruct. Journal of Nondestructive Evaluation.* – 2017. – Vol. 36. – Is. 2. Pp. 36-43. <https://doi.org/10.1007/s10921-017-0421-9>
9. Новиков В.Ф., Зависимость коэрцитивной силы малоуглеродистых сталей от одноосных напряжений / В.Ф. Новиков, Т.А. Яценко, М.С. Бахарев // *Дефектоскопия.* – 2001. – №11. – С. 51-57.
10. Изменение магнитных свойств метастабильной аустенитной стали при упругопластическом деформировании / Э.С. Горкунов, С.М. Задворкин, С.Ю. Митропольская, Д.И. Вичужанин, К.Е. Соловьев // *МиТОМ.* – 2009. – №9. – С. 15-21.
11. Мисухин С.А., Об использовании коэрцитивной силы в качестве индикаторного параметра при неразрушающем контроле механических напряжений / С.А. Мисухин, В.Ф. Новиков, В.Н. Борисенко // *Дефектоскопия.* – 1987. – №9. – С. 57-60.

12. Бида Г.В., Влияние упругой деформации на магнитные свойства сталей с различной структурой / Г.В. Бида, В.Г. Кулеев // Дефектоскопия. – 1998. – № 11. – С. 12-26.
13. Gonchar A.V., Estimation of structural degradation of the heat affected zone of the welded joint under fatigue / A.V. Gonchar, M.S. Anosov, D.A. Ryabov // Russ. J. Nondestruct. – 2022. – Vol. 58. – Is. 9. Pp. 790-799. <https://doi.org/10.1134/S1061830922090066>
14. Danilov V.A., On the quantitative assessment of corrosion damages of aluminium at the early stages using confocal laser scanning microscopy / V.A. Danilov, D.L. Merson // Lett. Mater. – 2022. – Vol. 12. – Is. 3. Pp. 261-265. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2022-3-261-265>
15. Kabaldin Y.G., Microstructure, phase composition and mechanical properties of a layered bimetallic composite ER70S-6-ER309LSI obtained by the WAAM method / Y.G. Kabaldin, D.A. Shatagin, D.A. Ryabov, A.A. Solovyov, A.A. Kurkin // Metals. – 2023. – Vol. 13. – Is. 5. Pp. 818-851. <https://doi.org/10.3390/met13050851>
16. Кабалдин Ю. Г., Оценка влияния термической обработки на параметры структуры и хладостойкость металлов, полученных аддитивным электродуговым выращиванием/ Кабалдин Ю. Г., Аносов М.С., Рябов Д. А., Шатагин Д. А., Хлыбов А.А., Матвеев Ю. И.// Вестник ВГАВТ Научные проблемы водного транспорта, - 2022. -№70, С.30-38
17. Хлыбов А. А., Исследование связи скорости ультразвука в металлах с их ударной вязкостью и твердостью в условиях пониженных температур/ Хлыбов А. А., Кабалдин Ю. Г., Рябов Д. А., Матвеев Ю. И.// Вестник ВГАВТ Научные проблемы водного транспорта, - 2020. -№65, С.60-67

#### References

1. Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C. “Additive manufacturing of metals” Acta Mater 117 (2016): 371-392 <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
2. ZHukov V.V., Grigorenko G.M., SHapovalov V.A. “Additivnoe proizvodstvo metallicheskih izdelij (obzor)” Avtomaticheskaya svarka 5-6 (2016): 148-153.
3. Wu B., Pan Z., Ding D., Cuiuri D., Li H., Xu J., Norrish J. “A review of the wire arc additive manufacturing of metals: Properties, defects and quality improvement” J. Manuf. Process 35 (2018): 127-139 <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001>
4. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. “Wire-feed additive manufacturing of metal components: Technologies, developments and future interests” Int. J. Adv. Manuf. Technol 81 (2015): 465-481 <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>
5. Yu.G. Kabaldin, M.S. Anosov, D.A. Ryabov, P.V. Kolchin, D.A. SHatagin, A.V. Kiselev. “Issledovanie vliyaniya rezhimov 3D-pechati na strukturu i hladostojkost' stali 08G2S” Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova 4 (2021): 64-70 <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-64-70>
6. Ron T., Levy G.K., Dolev O., Leon A., Shirizly A., Aghion E. “Environmental behavior of low carbon steel produced by a wire arc additive manufacturing process” Metals 9 (2019): 888-900 <https://doi.org/10.3390/met9080888>
7. Szelażek J., Mackiewicz S., Kowalewski Z. “New samples with artificial voids for ultrasonic investigation of material damage due to creep” NDT & E Int 42/2 (2009): 150-156 <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2008.11.004>
8. Makowska K., Piotrowski L., Kowalewski Z.L. “Prediction of the mechanical properties of P91 steel by means of magneto-acoustic emission and acoustic birefringence” Nondestruct. Journal of Nondestructive Evaluation 36/2 (2017): 36-43 <https://doi.org/10.1007/s10921-017-0421-9>
9. Novikov V.F., YAcenko T.A., Baharev M.S. “Zavisimost' koercitivnoj sily malouglerodistyh stalej ot odnoosnyh napryazhenij” Defektoskopiya 11 (2001): 51-57.
10. Gorkunov E.S., Zadvorkin S.M., Mitropol'skaya S.Yu., Vichuzhanin D.I., Solov'ev K.E. “Izmenenie magnitnyh svojstv metastabil'noj austenitnoj stali pri uprugoplasticheskom deformirovanii” MiTOM 9 (2009): 15-21.
11. Misuhin S.A., Novikov V.F., Borisenko V.N. “Ob ispol'zovanii koercitivnoj sily v kachestve indikatornogo parametra pri nerazrushayushchem kontrole mekhanicheskikh napryazhenij” Defektoskopiya 9 (1987): 57-60.
12. Bida G.V., Kuleev V.G. “Vliyanie uprugoj deformacii na magnitnye svojstva stalej s razlichnoj strukturoj” Defektoskopiya 11 (1998): 12-26.

13. Gonchar A.V., Anosov M.S., Ryabov D.A. "Estimation of structural degradation of the heat affected zone of the welded joint under fatigue" Russ. J. Nondestruct 58/9 (2022): 790-799 <https://doi.org/10.1134/S1061830922090066>
14. Danilov V.A., Merson D.L. "On the quantitative assessment of corrosion damages of aluminium at the early stages using confocal laser scanning microscopy" Lett. Mater 12/3 (2022): 261-265 <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2022-3-261-265>
15. Y.G. Kabaldin, D.A. Shatagin, D.A. Ryabov, A.A. Solovyov, A.A. Kurkin "Microstructure, phase composition and mechanical properties of a layered bimetallic composite ER70S-6-ER309LSI obtained by the WAAM method" Metals 13/5 (2023): 818-851 <https://doi.org/10.3390/met13050851>
16. Kabaldin Yu. G., Assessment of the effect of heat treatment on the structure parameters and cold resistance of metals obtained by additive electric arc cultivation/ Kabaldin Yu. G., Anosov M.S., Ryabov D. A., Shatagin D. A., Khlybov A.A., Matveev Yu. I.// Vestnik VGAVT Scientific problems of water transport, - 2022. -No.70, pp.30-38
17. Khlybov A. A., Investigation of the relationship of ultrasound velocity in metals with their toughness and hardness at low temperatures/ Khlybov A. A., Kobaldin Yu. G., Ryabov D. A., Matveev Yu. I.// Vestnik VGAVT Scientific problems of water transport, - 2020. -No.65, pp.60-67

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Александр Анатольевич Хлыбов**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение, технологии материалов и термическая обработка металлов», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: [hlybov\\_52@mail.ru](mailto:hlybov_52@mail.ru)

**Дмитрий Александрович Рябов**, ассистент кафедры «Материаловедение, технологии материалов и термическая обработка металлов», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: [riabov.da@nntu.ru](mailto:riabov.da@nntu.ru)

**Александр Александрович Соловьев**, техник кафедры «Материаловедение, технологии материалов и термическая обработка металлов», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: [solovev.aa@nntu.ru](mailto:solovev.aa@nntu.ru)

**Максим Сергеевич Аносов**, к.т.н., доцент кафедры «Технология и оборудование машиностроения», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: [anosov-maksim@list.ru](mailto:anosov-maksim@list.ru)

**Юрий Иванович Матвеев**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Эксплуатации судовых энергетических установок», Волжский государственный университет водного

**Alexander A. Khlybov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Materials Science, Materials Technology and Heat Treatment of Metals, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 603950

**Dmitry A. Ryabov**, Assistant of the Department of Materials Science, Materials Technology and Heat Treatment of Metals, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 603950

**Alexander A. Solovyov**, Technician of the Department of Materials Science, Materials Technology and Heat Treatment of Metals, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 603950

**Maksim S. Anosov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology and Equipment for Mechanical Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 603950

**Yuri I. Matveev**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Operation of Ship Power Plants, Volga State University of

транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Water Transport, 603951  
Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail:  
matveeveseu@mail.ru

Статья поступила в редакцию 03.05.2023; опубликована онлайн 20.06.2023.  
Received 03.05.2023; published online 20.06.2023.

УДК 531.391.1:532.5.011  
DOI: 10.37890/jwt.vi75.358

## **Численное моделирование испытаний составного крыла экраноплана в аэродинамической трубе**

**Е.Ю. Чебан**<sup>1</sup>

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

**А.Н. Лучков**<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия*

<sup>2</sup>*АО «НЦВ Миль и Камов», г. Москва, Россия*

<https://orcid.org/0000-0003-2391-6647>

**Аннотация.** Одним из базовых этапов создания экраноплана является обоснование его аэро- и гидродинамических характеристик, т.к. они наравне с массой судна и силовой установкой, определяют его экономические параметры – топливную и транспортную эффективность. На начальном этапе проектирования для этого необходимы формулы, которые позволят упростить процесс поиска оптимальных геометрических характеристик в зависимости от размерности и условий эксплуатации экраноплана, что требует большого количества экспериментальных данных. Одним из способов получения информации о связи гидродинамических, геометрических и эксплуатационных параметров является численное моделирование на основе вычислительной гидродинамики (CFD). В настоящей работе приведены результаты отработки параметров численного моделирования на основе сопоставления с результатами экспериментов в аэродинамической трубе ЦАГИ для составного крыла экраноплана. Описан процесс подготовки и численного моделирования аэродинамики составного крыла в программном комплексе ANSYSFluent. Обоснован выбор модели турбулентности и параметры расчетной сетки, в том числе разрешение пограничного слоя. Выполненное сравнение результатов эксперимента и численного моделирования показало хорошую сходимость, что делает выбранные параметры пригодными для получения аэродинамических характеристик различных компоновочных решений экранопланов типа «С».

**Ключевые слова:** численное моделирование, аэродинамические коэффициенты, экранный эффект, экраноплан, модели турбулентности, составное крыло, ANSYS FLUENT, валидация результатов, продувка в аэродинамической трубе.

## **Numerical simulation of tests of ekranoplan composite wing in a wind tunnel**

**Egor Yu. Cheban**<sup>1</sup>

**Andrey N. Luchkov**<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

<sup>2</sup>*JSC «NCV Mil and Kamov», Moscow, Russia*

**Abstract.** One of the basic stages in the creation of an ekranoplan is the substantiation of its aero- and hydrodynamic characteristics, since they, along with the mass of the vessel and the power plant, determine its economic parameters - fuel and transport efficiency. At the initial design stage, this requires formulas that will simplify the process of finding the optimal geometric characteristics depending on the dimension and operating conditions of the ekranoplan, which requires a large amount of experimental data. One way to obtain information about the relationship between hydrodynamic, geometric and operational parameters is numerical simulation based on computational fluid dynamics (CFD). This paper presents the results of numerical simulation parameters development based on comparison with the results of experiments in the TsAGI wind tunnel for the composite wing

of an ekranoplan. The process of preparing and numerically modeling the aerodynamics of a composite wing in the ANSYSFluent software package is described. The choice of the turbulence model and the parameters of the computational grid, including the resolution of the boundary layer, is justified. The comparison of the experimental results and numerical simulation showed good convergence, which makes the selected parameters suitable for obtaining aerodynamic characteristics of various layout solutions of "C" type ekranoplans.

**Keywords:** numerical modeling, aerodynamic coefficients, screen effect, ekranoplan (WIG – Wing-In-Ground effect), turbulence models, composite wing, ANSYS FLUENT, validation of results, wind tunnel blowing.

### **Введение**

Численное моделирование в проектировании водного транспорта занимает крайне важную роль, т.к. позволяет существенно сократить расходы финансовых и временных ресурсов при высоком качестве получаемых результатов и более низком соотношении стоимости одного эксперимента ко времени его осуществления. Особенно это заметно в задачах оптимизации технических решений, сбора и обработки статистических данных, где количество экспериментов может достигать сотен или тысяч.

Разработка аэродинамической и гидродинамической численной модели экраноплана [1] является важным этапом жизненного цикла судна, в первую очередь, из-за недостатка методических материалов и исходных данных для проектирования. Поэтому использование численного моделирования в ряде случаев является единственным способом, позволяющим получить необходимые данные. Другим достоинством этого метода является возможность не только просто рассчитать аэродинамические характеристики объекта, но и подобрать наиболее оптимальные с точки зрения получения наилучшего сочетания эксплуатационных свойств судна с учетом выполнения требований безопасности эксплуатации и технического задания. Важность выбора аэродинамических характеристик и их влияние на эксплуатационные свойства экранопланов описана в работе [2].

С другой стороны, численное моделирование не лишено недостатков, одним из которых является необходимость проверки и подтверждения полученных результатов экспериментальным путем, что требует дополнительных затрат времени и средств, но практически гарантирует получение данных пригодных для использования в расчетах по обоснованию облика экраноплана.

Анализ научных исследований в области проектирования экранопланов, в частности, источников [3-11] показал, что вопрос исследования сходимости численного моделирования составного крыла экраноплана с натурным экспериментом изучен недостаточно полно.

Основной проблемой адекватного как численного, так и экспериментального моделирования экранопланов, является сложность гидроаэродинамических явлений, происходящих при его движении на экране.

Изучение работ [3-11] показало невозможность использования опыта моделирования классических видов несущих поверхностей экранопланов для проверки сходимости, поскольку эти работы в большей степени посвящены практике численного эксперимента, что делает затруднительным использование результатов этих работ в исследованиях смежных вопросов.

В некоторых работах, например, [3,4], [10] приводятся описания геометрической и сеточной моделей, однако отсутствие необходимой детализации затрудняет проверку полученных данных. К основным недостаткам выполненных работ можно отнести следующие:

1. недостаточная информация о размерах расчетной области и ее локальных компонентов;

2. неполное описание выбранной геометрической модели, в части решения задачи продувки модели целиком или в симметричной постановке относительно плоскости симметрии крыла экраноплана;
3. не в полной мере обоснован выбор метода аэродинамического исследования крыла при движении у поверхности земли, в частности способ формирования эффекта экрана:
  - метод подвижного экрана;
  - метод неподвижного экрана;
  - метод неподвижного экрана со сдувом пограничного слоя;
  - метод симметрии крыла.

В описаниях расчетных сеток и способов их построения приводится как правило только информация о количестве расчетных ячеек и тип используемой сетки, а информация о характере сетки в области пограничного слоя, в зонах формирования и схода схода потока крыла, развития вихря индуктивного сопротивления, недостаточна для однозначного повторения результатов.

В различных работах большое внимание уделено вопросам выбора модели турбулентности и ее пристеночным функциям, а также исходным данным: характеристикам среды, режимам движения, положению крыла относительно экрана, сравнению полученных данных с результатами экспериментов.

Анализ выполненных ранее исследований [12, 13]. показал недостаточную проработку вопросов численного моделирования составных крыльев экраноплана, в том числе проверки адекватности результатов моделирования.

Таким образом, целью настоящей работы является отработка методики численного моделирования составного крыла экраноплана с проверкой ее адекватности по результатам экспериментальных исследований в аэродинамической трубе.

Полученные численные результаты позволят выполнить параметрическое исследование аэродинамики крыльев различных конфигураций при движении у поверхности земли.

### **1. Экспериментальное исследование обтекания составного крыла в аэродинамической трубе ЦАГИ**

Использованное в экспериментах крыло [12], представляло собой составную несущую поверхность, состоящую из двух частей – центроплана и консолей рис. 1. Центроплан разделен дополнительно шайбой на 2 части для предполагаемого поддува от подъемно-маршевой силовой установки.

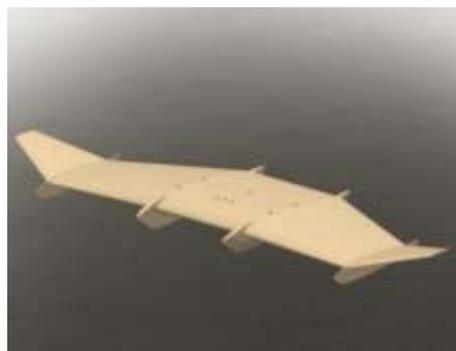


Рис. 1. Твёрдотельная геометрия изолированного крыла



Рис. 2. Модель крыла в составе экраноплана в аэродинамической трубе

Исследование модели осуществлялось в трубе Т-5 НИМК ЦАГИ методом неподвижного экрана при скорости потока  $V \approx 40$  м/с на относительных высотах

$\bar{h}=0,15; 0,2; 0,3; 0,5; 0,75, 1,0$  в диапазоне углов атаки  $\alpha=0-18$  градусов и в свободном потоке ( $\bar{h}=\infty$ ) при  $\alpha=-4-24$  градусов. Полученные в эксперименте аэродинамические характеристики были представлены в скоростной системе координат и отнесены к скоростному напору, площади крыла  $S_{кр} = 0.355\text{м}^2$  и его средней аэродинамической хорде  $b_a=0.325$  м. При этом величина  $h$  равнялась расстоянию от задней точки средней аэродинамической хорды модели до плоскости экрана, отнесенному к  $b_{сах}$ . Компоновка модели планера экраноплана включала трапециевидное крыло относительной толщины  $c=0.1$  с профилем ЦАГИ-876, удлинением  $\lambda=3.1$ , с концевыми шайбами высотой  $H=0.10$ ; скеги, как часть бокового ограждения воздушной подушки ( $\lambda_{подушки}=0.81$ ); дополнительные консоли, находящиеся под углом  $15^\circ$  к плоскости хорд основного крыла и увеличивающие его удлинение до  $\lambda = 4.8$ .

## **2. Численное моделирование аэродинамики исследование обтекания составного крыла экраноплана**

Построение расчётного домена выполнялось в модуле ANSYSDesignModeller: для различных углов атаки и относительных высот полета, а также производилось назначение именованных ссылок основных рабочих поверхностей твердотельной модели крыла. Значения углов атаки и высоты полета для численного моделирования назначались идентичными экспериментальным продувкам в аэродинамической трубе [12].

В расчетной области в качестве материала сплошной среды задан воздух при нормальных условиях. На внешних границах расчетной области, имеющей форму параллелепипеда, заданы граничные условия:

- втекания потока в моделируемую область течения со скоростью, по абсолютной величине равной скорости движения компоновки экраноплана, параллельно экрану (типа inlet) – нормальная скорость воздушного потока - 25 м/с.
- подвижного экрана со скоростью, равной скорости втекания потока в моделируемую область (типа movingwall);
- свободного истечения из моделируемой области без дополнительного перепада давления (типа Outlet);
- симметрии (типа Symmetry) – поскольку крыло симметрично относительно продольной плоскости;
- границы на боковой и верхней стенках без дополнительного перепада давления (типа wall).

Размеры расчетной области выбирались относительно размера средней аэродинамической хорды и размаха крыла:

- перед крылом – 10 длин хорд;
- за крылом – 20 длин хорд;
- над крылом – 10 длин хорд;
- сбоку от крыла – 10 размахов крыла.

Данное сочетание размеров расчетной области от модели считается оптимальным по итогам изучения работы [13].

Для построения контрольно-объемной сеточной модели использовалось программное обеспечение ANSYS FluentMeshing.

Разрешение сетки пограничного слоя выполнялось с учетом формул (1) и (2). Высота первой ячейки пограничного слоя, с учетом модели турбулентности  $k-\epsilon$  realizable определялась с использованием формулы (1) [14]:

$$\Delta y = 8,6y^+ \frac{\nu}{U} Re_L^{1/14} = 17,2y^+ L Re_L^{-(13/14)} \quad (1)$$

Также было проведено моделирование с использованием  $k-\omega$  SST модели турбулентности, которое также показало удовлетворительную сходимость с экспериментом в аэродинамической трубе (рис. 4). Однако использование этой модели турбулентности требует более сильного измельчения сетки в области пограничного слоя. Для получения хорошей сходимости с экспериментом сетка пограничного слоя несущей поверхности выполнялась под высоту первого слоя, соответствующей  $y^+$  не более 4, что приводит к существенному увеличению общего количества ячеек и снижению производительности выполняемых расчетов.

Для модели турбулентности  $k-\varepsilon$  *realizable* принималось  $y^+ = 20$ . Значение числа Рейнольдса рассчитывалось для высоты полета 0 в нормальных условиях в соответствии с МСА. Высота сетки пограничного слоя рассчитывалась по формуле (2):

$$\Delta t = 0.37 \frac{L}{Re_L^{0,2}} \quad (2)$$

Исследование сеточной сходимости выполнялось с учетом построения сетки вокруг крыла и на его законцовках в области схода вихрей индуктивного сопротивления. Итоговый вид расчётной области представлен на рис. 4. Размеры сетки в расчетном домене и на поверхностях крыла определялись последовательным численным моделированием с изменением параметров сетки до получения погрешности результатов не более 5% (табл.1):

1. начальная сетка в расчетной области – 0,1 м;
2. сетка на поверхности крыла – 0,0025 м;
3. адаптация сетки в области схода вихрей индуктивного сопротивления – 0,005 м;
4. адаптация сетки в местах изменения формы крыла и градиентов скорости и давления – 0,01 м;
5. локальное измельчение сетки в зоне носка и в хвостовой части крыла до 0,0005 м.

Для проверки сеточной сходимости использовалось 4 различных сетки, отличающиеся по общему числу ячеек и их размерам. Результаты проверки сеточной сходимости представлены в таблице 1.

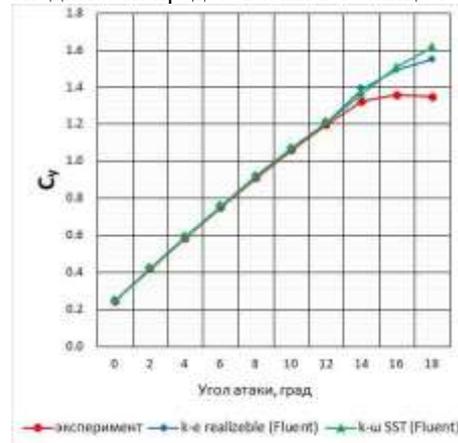


Рис. 4. Сравнение результатов моделирования с экспериментом для различных моделей турбулентности

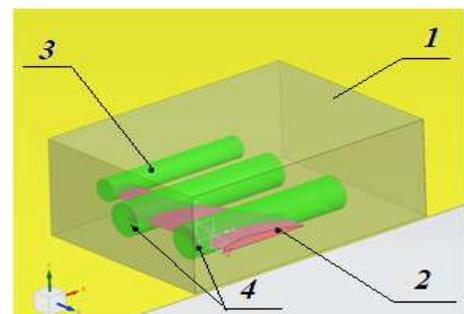


Рис. 5. Структура расчетной сетки при численном моделировании

Таблица 1

Результаты исследования сеточной сходимости

N/N	Количество ячеек сетки, млн	Максимальное аэродинамическое качество	Отличие от результата эксперимента, %
1.	0,5	15	54
2.	3,5	24	17
3.	7	30	3
4.	12	30	3

Тип использованной сетки – неструктурированная полигексаэдрическая. Коэффициент роста сеток назначался 1.1 для всех случаев, количество буферных слоев в переходной зоне – 3-5. Для  $k-\varepsilon$  *realizable* модели турбулентности высота первой ячейки 0.0001 м. при коэффициенте роста 1.3; для  $k-\omega$  *SST* модели турбулентности высота первой ячейки 0.00004 м. и коэффициент роста 1.15. Примеры используемой сетки показаны на рис. 6.

Начальные условия соответствовали значениям МСА при  $H=0$  м.

Численное моделирование производилось на компьютере AMD Ryzen 9/3900 с оперативной памятью 64 Гб. В соответствии с рекомендациями обеспечения ANSYSFluent в процессе расчета было задействовано порядка 70% вычислительной мощности, что примерно соответствует 16 задействованным потокам процессора.

3. Результаты и обсуждение

Сопоставление аэродинамических характеристик составного крыла экраноплана, полученных методом численного моделирования в ANSYSFluent, с результатами экспериментальных продувок в аэродинамической трубе Т-5 ЦАГИ, показывает хорошую сходимость (рис. 7 и 8).

Максимальное значение погрешности коэффициентов подъемной силы  $C_y$  и аэродинамического сопротивления  $C_x$  находится в пределах 5% при углах атаки с безотрывным обтеканием потока на верхней поверхности крыла. Значения выше  $C_y^{доп}$  имеют отличия от результатов продувок в аэродинамической трубе не более 15%, что соответствует углам атаки с началом отрыва потока и его развитием.

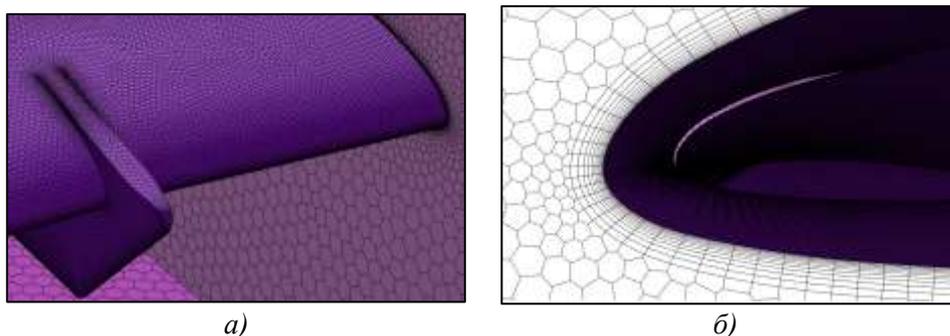


Рис. 6. Примеры использованной расчетной сетки

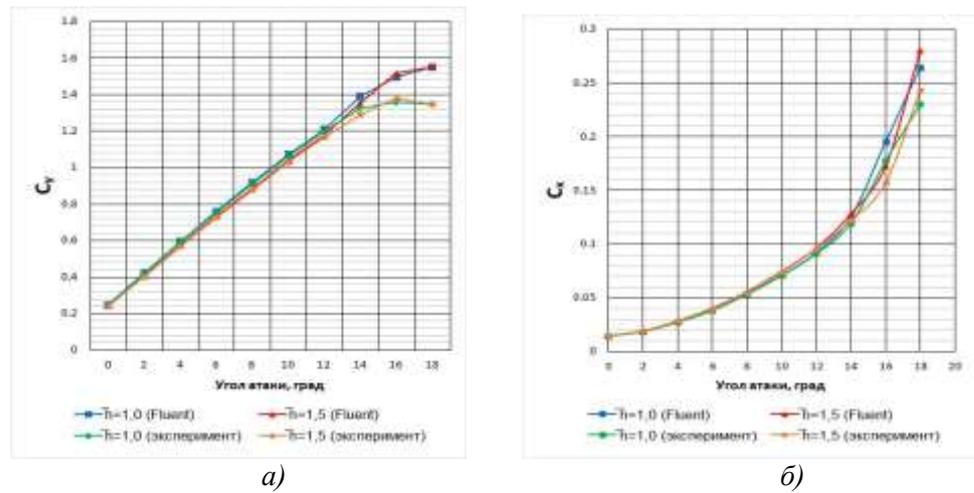


Рис. 7. Сопоставление результатов численного моделирования и экспериментов в аэродинамической трубе для относительных высот полета  $\bar{h} = 1,0$  и  $\bar{h} = 1,5$

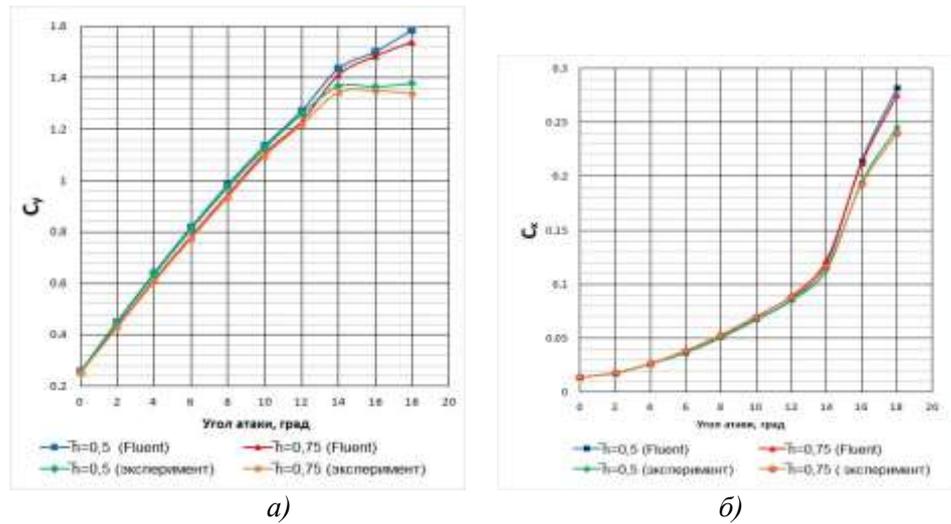


Рис. 8. Сопоставление результатов численного моделирования и экспериментов в аэродинамической трубе для относительных высот полета  $\bar{h} = 0,5$  и  $\bar{h} = 0,75$

Разница в результатах моделирования и эксперимента при углах атаки  $C_y^{доп}$ , видимо, обусловлена недостатком использованных моделей турбулентностей, которые плохо предсказывают зоны образования и развития отрывов воздушного потока, особенно для уменьшенных объектов. С другой стороны, практические углы атаки составного крыла экраноплана не превышают 10 градусов и находятся в докритической области, поэтому задача моделирования отрывных течений в настоящей работе не решалась.

Подобная картина наблюдается для всех относительных высот полета  $\bar{h}$  в диапазоне  $\bar{h}=0,15; 0,2; 0,3; 0,5; 0,75; 1,0$ .

Разработанные условия проведения численного эксперимента необходимы для определения несущих свойств крыльев при полете у поверхности земли на взлетно-посадочных и крейсерских режимах полета, а также позволяют проводить

исследования в области оптимизации формы крыла экраноплана, условий его эксплуатации относительно зоны действия экрана. Полученные результаты позволили выполнить исследования аэродинамики крыльев различной конфигурации при движении на экране, с целью создания проектной методики для упрощения процесса поиска оптимальных геометрических характеристик в зависимости от размерности и условий эксплуатации экраноплана.

Анализ погрешностей дает возможность сделать вывод, что решенную задачу возможно использовать для настройки сеточных моделей и препроцессора решаемых задач при исследовании аэродинамики несущих поверхностей, движущихся у поверхности земли.

### 3. Заключение

В настоящей работе представлены результаты выбора и обоснования параметров численного моделирования составного крыла экраноплана в программном комплексе ANSYSFluent. Для валидации результатов моделирования использовались экспериментальные данные по продувкам составного крыла в аэродинамической трубе ЦАГИ. Погрешность между экспериментальными и численными результатами для сеток с числом ячеек 7-12 миллионов при разных способах разрешения пограничного слоя и моделях турбулентности ( $k-\varepsilon$  *realizable* модель высота первой ячейки 0.0001 м. при коэффициенте роста 1.3; для  $k-\omega$  SST модели высота первой ячейки 0.00004 м.). Увеличение погрешности для углов атаки более 10 градусов связано с ограничениями численных методов при моделировании отрывных течений.

### Список литературы

1. Rozhdestvensky, K. V. Wing-in-ground effect vehicles / K. V. Rozhdestvensky // . – 2006. – Vol. 42, No. 3. – P. 211-283. – DOI 10.1016/j.paerosci.2006.10.001. – EDN LKBLCLJ.
2. Лучков, А.Н. Оценка критериев эффективности гражданских экранопланов / А.Н. Лучков, Е.Ю. Чебан // Великие реки - 2020: Труды 22-го международного научно-промышленного форума, Нижний Новгород, 27–29 мая 2020 года. – Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2020. – С. 12
3. Февральских А.В. Численное исследование влияния удлинения крыла на характеристики движения под действием экранного эффекта амфибийного судна на воздушной подушке с аэродинамической разгрузкой // Изв. КГТУ - 2019 - № 53 - С. 182-192.
4. Грамузов Е.М., Любимов В.И., Смирнов К.В., Соснов А.В., Февральских А.В. Автоматизированная оптимизация компоновки крыла и горизонтального оперения экраноплана по результатам численного моделирования аэродинамики // Морские интеллектуальные технологии. - 2019. - № 1 (43) - Т.3. - С. 3847.
5. Вшивков Ю.Ф., Галушко Е.А., Кривель С.М. Аэродинамическое проектирование экраноплана с высокими несущими свойствами на основе численного моделирования с применением ansys. В сборнике: Авиационное строительство и транспорт Сибири. сборник статей IV Всероссийской научно-практической конференции. Иркутский государственный технический университет. 2014. С. 51-55.
6. Грамузов Е.М., Февральских А.В., Махнев М.С. Исследование продольной устойчивости экраноплана типа "летающее крыло" с использованием технологий вычислительной гидродинамики Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2020. № 60-61. С. 66-74.
7. Бродский С.А., Небылов А.В., Панферов А.И., Небылов В.А. Применение CFD для проектирования системы управления движением экраноплана Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 1-1 (47). С. 186-192.
8. Maimun A. Aerodynamic Behavior of a Compound Wing Configuration in Ground Effect. Jurnal Teknologi. Malasia. 2014
9. Yang W. Effects of design parameters on longitudinal static stability for WIG craft. International Journal of Aerodynamics. China. 2010.

10. Февральских, А.В. Разработка методики проектирования аэрогидродинамической компоновки амфибийного судна на воздушной подушке с аэродинамической разгрузкой на основе численного моделирования: дис. ... канд. техн. наук.- Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2017. - 175 с.
11. Jia, Q., Yang, W., Yang, Z. Numerical study on aerodynamics of banked wing in ground effect, Tongji University, Shanghai, China, 2016. – 520 p.
12. Абдуллин А.П. Аэродинамические характеристики и продольная устойчивость схематизированной модели экраноплана самолетной схемы на крейсерском режиме полета // Сборник докладов XI международной научной конференции по амфибийной и безаэродромной авиации «Гидроавиасалон-2016». Часть 1. Геленджик, 2016. – 278 с.
13. Визель Е.П., Захарченко Ю.А., Григорьев А.А., о влиянии дополнительных несущих поверхностей на аэродинамические характеристики экраноплана самолетной схемы. // Сборник докладов X международной научной конференции по амфибийной и безаэродромной авиации «Гидроавиасалон-2014». Часть 1. Геленджик, 2014. – 260 с.
14. Ляскин А.С., Фролов В.А., Расчёт аэродинамических профилей по моделям идеальной и вязкой жидкости. ФГБОУ Самарский государственный университет им. Академика С.П. Королева (НИУ). Самара. – 2011. – 26 с.

#### References

1. Rozhdestvensky, K. V. Wing-in-ground effect vehicles / K. V. Rozhdestvensky // . – 2006. – Vol. 42, No. 3. – P. 211-283. – DOI 10.1016/j.paerosci.2006.10.001. – EDN LKBLCJ.
2. Luchkov Andrey N., Cheban Egor Yu. Evaluation of performance criteria for heavy passenger ekranoplanes // Velikie reki - 2020: Trudy 22-go mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma, Nizhnij Novgorod, 27–29 maja 2020 goda. – Nizhnij Novgorod: Volzhskij gosudarstvennyj universitet vodnogo transporta, 2020. – S. 12.
3. Fevral'skih A.V. Chislennoe issledovanie vlijanija udlinenija kryla na harakteristiki dvizhenija pod dejstviem jekrannogo jeffekta amfibijnogo sudna na vozdušnoj podushke s ajerodinamicheskoj razgruzkoj // Izv. KGTU - 2019 - № 53 - S. 182-192.
4. Gramuzov E.M., Ljubimov V.I., Smirnov K.V., Sosnov A.V., Fevral'skih A.V. Avtomatizirovannaja optimizacija komponovki kryla i gorizontalnogo operenija jekranoplana po rezul'tatam chislennogo modelirovanija ajerodinamiki // Morskie intellektual'nye tehnologii. - 2019. - № 1 (43) - T.3. - S. 3847.
5. Vshivkov Ju.F., Galushko E.A., Krivel' S.M. Ajerodinamicheskoe proektirovanie jekranoplana s vysokimi nesushhimi svojstvami na osnove chislennogo modelirovanija s primeneniem ansys. V sbornike: Aviamashinostroenie i transport Sibiri. sbornik statej IV Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii. Irkutskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet. 2014. S. 51-55.
6. Gramuzov E.M., Fevral'skih A.V., Mahnev M.S. Issledovanie prodol'noj ustojchivosti jekranoplana tipa "letajushhee krylo" s ispol'zovaniem tehnologij vychislitel'noj gidrodinamiki Nauchno-tehničeskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva. 2020. № 60-61. S. 66-74.
7. Brodskij S.A., Nebylov A.V., Panferov A.I., Nebylov V.A. Primenenie CFD dlja proektirovanija sistemy upravlenija dvizheniem jekranoplana Morskie intellektual'nye tehnologii. 2020. № 1-1 (47). S. 186-192.
8. Maimun A. Aerodynamic Behavior of a Compound Wing Configuration in Ground Effect. Jurnal Teknologi. Malasia. 2014
9. Yang W. Effects of design parameters on longitudinal static stability for WIG craft. International Journal of Aerodynamics. China. 2010.
10. Fevral'skih, A.V. Razrabotka metodiki proektirovanija ajerogidrodinamicheskoj komponovki amfibijnogo sudna na vozdušnoj podushke s ajerodinamicheskoj razgruzkoj na osnove chislennogo modelirovanija: dis. ... kand. tehn. nauk.- Nizhnij Novgorod: NGTU im. R.E. Alekseeva, 2017. - 175 s.
11. Jia, Q., Yang, W., Yang, Z. Numerical study on aerodynamics of banked wing in ground effect, Tongji University, Shanghai, China, 2016. – 520 p.
12. Abdullin A.P. Ajerodinamicheskie harakteristiki i prodol'naja ustojchivost' shematizirovannoj modeli jekranoplana samoletnoj shemy na krejserskom rezhime poleta // Sbornik dokladov XI mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii po amfibijnoj i bezajerodromnoj aviacii «Gidroaviasalon-2016». Chast' 1. Gelendzhik, 2016. – 278 s.

13. Vizeľ E.P., Zaharchenko Ju.A., Grigor'ev A.A., o vlijanii dopolnitel'nyh nesushhih poveryhnostej na ajerodinamicheskie harakteristiki jekranoplana samoletnoj shemy. // Sbornik dokladov X mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii po amfibijnoj i bezajerodromnoj aviacii «Gidroaviasalon-2014». Chast' 1. Gelendzhik, 2014. – 260 s.
14. Ljaskin A.S., Frolov V.A., Raschjot ajerodinamicheskih profilej po modeljam ideal'noj i vjazkoj zhidkosti. FGBOU Samarskij gosudarstvennyj universitet im. Akademika S.P. Koroleva (NIU). Samara. – 2011. – 26 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

**Egor Yu. Cheban**, doctor of Technical Sciences, Associate 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

**Лучков Андрей Николаевич**, аспирант кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности судов, ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта», 603905, Нижний Новгород, Нестерова 5 e-mail: a.luchok.n@gmail.com

**Andrey N. Luchkov**, postgraduate student of Department of Hydrodynamics, Ship Theory and Environment Safety of Ships Volga State University of Water Transport, 603905, Nizhny Novgorod, Nesterova 5, e-mail: a.luchok.n@gmail.com

Статья поступила в редакцию 09.03.2023; опубликована онлайн 20.06.2023.  
Received 09.03.2023; published online 20.06.2023.

## **СУДОВОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ**

### **SHIP POWER EQUIPMENT**

УДК 621.43.018.7:536.8

DOI: 10.37890/jwt.vi75.373

#### **Сравнение показателей напряженности главного двигателя буксира-толкача при работе в режимах буксировки и толкания**

**В.Л. Конюков**

*Керченский государственный морской технологический университет, г Керчь, Россия*

**Аннотация.** Сохранение работоспособности судов, отработавших значительный ресурс с момента их постройки, позволит получить дополнительную прибыль. В работе выполнен сравнительный анализ эксплуатационных параметров главного двигателя буксира-толкача, работающего в режимах толкания и буксировки баржевых составов. Исследования выполнены расчетно-теоретическим способом. Основное внимание уделено анализу параметров главного двигателя, определяющих его механическую и тепловую напряженность. В соответствии с этим спрогнозированы области допустимых эксплуатационных режимов для толкания и буксировки баржевых составов. Утяжеление винтовой характеристики режима буксировки по сравнению с режимом толкания требует дополнительных ограничений по мощности и частоте вращения главного двигателя. Проведено сравнение критериев и параметров в характерных точках цикла дизеля для рассмотренных режимов. Дано обоснование отдельным параметрам цикла дизеля, которые могут использоваться как определяющие при назначении ограничительных характеристик по тепловой напряженности.

**Ключевые слова:** буксир-толкач, дизель, эксплуатационные параметры, нагрузка, винтовая характеристика, коэффициент утяжеления, ограничительная характеристика, тепловая напряженность, механическая напряженность, зона допустимых режимов.

#### **Comparison of main engine tension indicators tow-pusher when working in towing and pushing modes**

**Viacheslav L. Konyukov**

*Kerch State Marine Technological University, Kerch, Russia*

**Abstract.** Maintaining the operability of vessels that have worked out a significant resource since their construction will allow you to get additional profit. The paper presents a comparative analysis of the operational parameters of the main engine of a pusher tug operating in the modes of pushing and towing barge trains. The studies were carried out in a computational and theoretical way.

The main attention is paid to the analysis of the parameters of the main engine, which determine its mechanical and thermal tension. In accordance with this, the areas of permissible operating conditions for pushing and towing barge trains are predicted. The weighting of the screw characteristics of the towing mode in comparison with the pushing mode requires additional restrictions on the power and speed of the main engine.

The comparison of criteria and parameters at the characteristic points of the diesel cycle for the considered modes is carried out. Justification is given for individual parameters of the

diesel cycle, which can be used as determining when assigning restrictive characteristics for thermal tension

**Keywords:** tow-pusher, diesel, operational parameters, load, screw characteristic, weighting coefficient, restrictive characteristic, thermal stress, mechanical stress, zone of permissible modes.

### **Введение**

Основными режимами работы буксира-толкача являются буксировка и толкание баржевых составов. На долю этих судов приходится значительная часть перевозок негабаритных грузов. На отечественных верфях буксиры-толкачи строятся крайне редко, поэтому в эксплуатации, в основном, находятся небольшие буксиры 80-х и 90-х годов постройки. В связи с этим остро стоит вопрос о сохранении работоспособности таких судов [1].

Буксировка баржевых составов осуществляется буксирной лебедкой и сертифицированным буксирным снаряжением на определенное тяговое усилие. Для толкания барж в носовой части судна предусмотрены носовые упоры и специальные лебедки, позволяющие учалить баржу и толкач [2]. Движение буксира-толкача осуществляется, как правило, двумя винтами фиксированного шага, что позволяет иметь хорошую маневренность.

При работе в режиме толкания буксир-толкач располагается за кормой толкаемого судна, шарнирно с ним скрепленного и толкает его вперед. При таком расположении уменьшается сопротивление баржи из-за отсутствия струй, отбрасываемых винтами буксировщика на носовую часть баржи, а также уменьшается сопротивление буксира-толкача, так как он движется в попутном потоке буксируемого судна, снижается волновое сопротивление состава и отсутствует сопротивление буксировочного каната [3], [4].

Таким образом, для буксировки и толкания одной и той же баржи с одинаковыми скоростями требуется различный упор движителей, который в режиме буксировки будет больше, чем в режиме толкания. Для этого, однозначно, требуется увеличение мощности главных двигателей [5]. Тестовые заводские испытания главных дизелей проводятся при нагрузках, соответствующих условной винтовой характеристике, отклонение от которой вызывает изменение эксплуатационных параметров дизеля. Увеличение расхода топлива приводит к повышению давлений и температуры газа в характерных точках цикла, что может вызвать перегрузку главного двигателя [6]. При этом меняется характер горения топлива и структура тепловыделения в цилиндре [7].

Целью работы является сравнение эксплуатационных параметров и критериев, определяющих напряженность главных двигателей буксира-толкача, работающего в режимах толкания и буксировки, оценка диапазона допустимых режимов эксплуатации.

### **Материалы и методы исследования.**

В качестве объекта исследований выбран главный двигатель буксира-толкача «Угличанин», предназначенный для толкания и буксировки баржевых составов. Двигатель G6190Z<sub>1</sub>C-1 (6ЧНСП-19/21), четырехтактный с наддувом, номинальной мощностью 450 кВт, номинальной частотой вращения 1200 об/мин. Корпус буксира-толкача: длина по конструктивной ватерлинии (КВЛ) 29,4 м, ширина по КВЛ 9,6 м, осадка 2,44 м, площадь смоченной поверхности 268,4 м<sup>2</sup>, максимальная скорость свободного хода 10 узлов. Корпус баржи: длина по КВЛ 98,75 м, ширина по КВЛ 16 м, осадка 3,65 м, площадь смоченной поверхности корпуса 2095,1 м<sup>2</sup>.

Винтовые характеристики буксира при свободном ходе, винтовые характеристики состава (буксир-баржа) в режиме толкания и в режиме буксировки определялись по методике [8].

Исследования главного двигателя проводились расчетно-теоретическим способом по методике, разработанной кафедрой судовых энергетических установок КГМТУ. По алгоритму этой методики составлена программа для ЭВМ [9].

Анализ эксплуатационных параметров и критериев дизеля проводился в относительных величинах для каждой спецификационной характеристики и широкого диапазона его относительных мощностей  $0,25 \leq \bar{N}_e \leq 1,0$ . Относительная мощность определялась соотношением

$$\bar{N}_e = \frac{N_e}{N_{e0}}, \tag{1}$$

где  $N_{e0}$  – номинальная мощность дизеля при стопроцентной нагрузке и номинальной частоте вращения  $n_0$ , соответствующей винтовой характеристике номинального режима работы (расчетная характеристика), которая использовалась для определения нагрузки дизеля при тестовых заводских испытаниях.

Относительные параметры и критерии находились по выражениям

$$\bar{B} = \frac{B}{B_0}, \quad \bar{n} = \frac{n}{n_0}, \tag{2}$$

где  $B$  – значение параметра или критерия, соответствующего частоте вращения  $n$  конкретной винтовой характеристики;

$B_0, n_0$  – значения параметра и частоты вращения, соответствующие стопроцентной мощности номинальной (расчетной) винтовой характеристики.

### Результаты исследования и их обсуждение

Изменение параметров рабочего тела по циклу дизеля при переходе на новый эксплуатационный режим отражается, прежде всего, на характеристиках турбонаддувочного агрегата, приводящих к изменению давления наддува. Давление наддува определялось методом последовательных приближений с использованием гидравлической характеристики турбины, которая приведена на рис.1. Гидравлическая характеристика представляет зависимость степени понижения давления в турбине  $e_t$  от расхода газа  $G_t$ , которая находилась для номинальной винтовой характеристики дизеля. Аппроксимируя гидравлическую характеристику, получили выражение для определения давления газа перед турбиной  $p_t$

$$p_t = p_{2T} (1,8814 G_t + 0,5924), \tag{3}$$

где  $p_{2T}$  – давление газа за турбиной.

Таким образом, при исследовании дизеля, в процессе последовательных приближений подбиралось давление наддува  $p_n$ , соответствующее  $p_t$ , вычисленному по выражению (3).

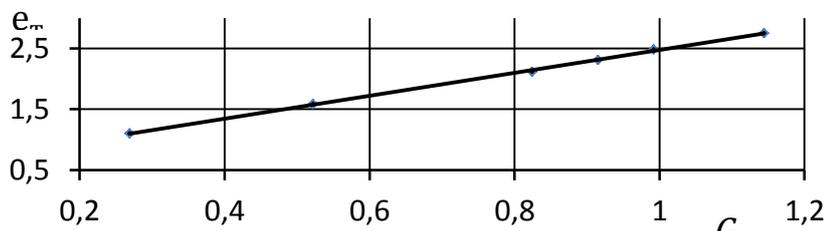


Рис. 1. Гидравлическая характеристика турбины турбокомпрессора

Винтовые характеристики буксира для различных спецификационных условий эксплуатации представлены на рис. 2. Если зависимость мощности от частоты вращения принять в виде соотношения

$$N_e = Cn^m, \quad (4)$$

то показатель степени:

$m=3$  для номинальной или расчетной винтовой характеристики, по которой определялась нагрузка на дизель при тестовых заводских испытаниях;

$m=3,214$  для винтовой характеристики состава буксир-баржа в режиме толкания;

$m=3,118$  для винтовой характеристики состава буксир-баржа в режиме буксировки.

Увеличение буксировочной мощности состава в режиме буксировки по сравнению с режимом толкания вызывает повышение механической напряженности дизеля, о чем свидетельствуют точки пересечения винтовых характеристик 3 и 4 с ограничительной характеристикой 5, соответствующей  $p_e = const$  ( $M_e = const$ ). С целью исключения механической перегрузки дизеля в режиме буксировки его максимально допустимая частота вращения должна быть уменьшена на 2,3% по сравнению с максимально допустимой частотой при толкании.

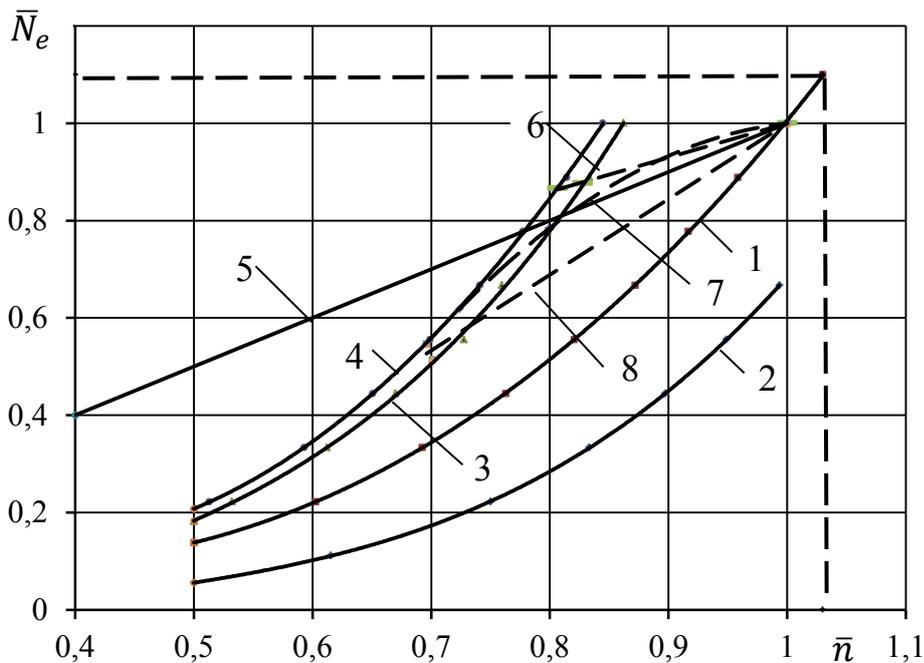


Рис. 2. Винтовые характеристики буксира-толкача:

- 1 – номинальная (расчетная); 2 – режима свободного хода;
- 3 – состава в режиме толкания; 4 – состава в режиме буксировки;
- 5 – ограничительная характеристика  $p_e = const$  ( $M_e = const$ );
- 6 – ограничительная характеристика  $p_z = const$ ; 7 – ограничительная характеристика по средней температуре за время цикла  $T_t = const$ ;
- 8 – ограничительная характеристика по максимальной температуре цикла  $T_z = const$  ( $T_b = const$ )

Утяжеление винтовой характеристики можно оценить коэффициентом утяжеления  $K_y$ , соответствующим конкретной частоте вращения, который находится

как отношение мощности утяжеленной характеристики к мощности номинальной (расчетной) характеристики. Для относительной частоты вращения  $\bar{n}=0,7$   $K_y = 1,48$  для режима толкания и  $K_y = 1,61$  для режима буксировки.

При построении ограничительных характеристик для каждой винтовой характеристики находились аппроксимационные зависимости вида  $\bar{n} = f(\bar{B})$ , где в качестве  $\bar{B}$  принимались эксплуатационные параметры или критерии, определяющие механическую или тепловую напряженность дизеля. По этим зависимостям вычислялись частоты  $\bar{n}$  для  $\bar{B}=1$ , что согласно выражению (2) соответствовало предельно допустимым значениям этих параметров или критериев. Мощность, соответствующая вычисленным частотам вращения дизеля находилась по уравнению (4). В качестве примера на рис. 3 приведена зависимость  $\bar{n} = f(\bar{p}_z)$  с аппроксимирующим уравнением и достоверностью аппроксимации.

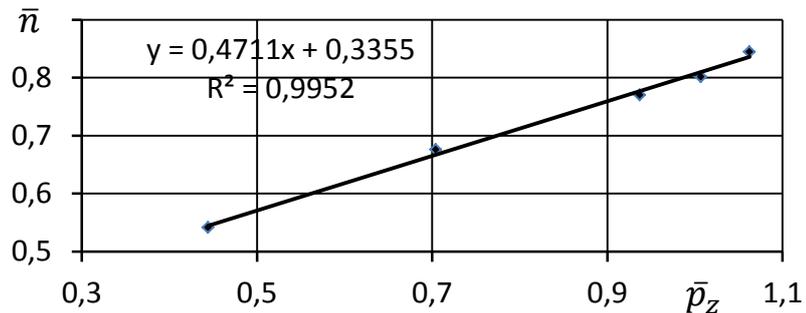


Рис. 3. Зависимость относительной частоты вращения от относительной величины максимального давления в режиме буксировки.

Сопоставление приведенных ограничительных характеристик с винтовыми характеристиками показал, что основным параметром, ограничивающим диапазон допустимых режимов эксплуатации по механической напряженности является среднее эффективное давление (характеристика 5, рис. 2). Характеристика  $p_z = const$  располагается выше и не оказывает определяющего ограничения на диапазон допустимых режимов.

Работа состава буксир-баржа в режиме толкания не будет иметь перегрузок по средней температуре рабочего тела за время цикла дизеля  $T_\tau$ , для диапазона допустимых режимов эксплуатации ограниченных характеристик  $p_e = const$  ( $M_e = const$ ). В режиме буксировки при  $\bar{n} > 0,75$  дизель будет работать с повышенной  $T_\tau$ , что может негативно отразиться на смазке деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ).

Характеристики, соответствующие максимальной температуре цикла  $T_z$  и температуре газа в конце процесса расширения в цилиндре  $T_b$  могут выполнять роль ограничительных характеристик  $T_z = const$  ( $T_b = const$ ) (зависимость 8, рис. 2), так как их увеличение приводит к повышенным термическим напряжениям в деталях ЦПГ по причине увеличения перепада температур между газом и охлаждающей водой. В свою очередь, повышение  $T_b$  увеличивает температуру выпускного клапана, что может привести к его перегреву. Исследования показали, что главный двигатель буксира-толкача, работающего с составом барж в режимах толкания и буксировки, не будет иметь механической и тепловой перегрузки, если относительная частота вращения коленчатого вала не будет превышать  $\bar{n}=0,7$ .

В связи с тем, что режим буксировки баржи соответствует более тяжелой винтовой характеристике по сравнению с режимом толкания, в работе выполнен

сравнительный анализ основных эксплуатационных параметров дизеля для этих режимов в зависимости от нагрузки дизеля  $\bar{N}_e$ . С этой целью для каждого исследуемого параметра определялось его относительное изменение для режима буксировки по сравнению с режимом толкания в соответствии с формулой:

$$\delta \bar{B} = \frac{B_T - B_6}{B_{p0}}, \quad (5)$$

где  $B_T$  – значение эксплуатационного параметра в режиме толкания;

$B_6$  – значение эксплуатационного параметра в режиме буксировки для той же относительной мощности;

$B_{p0}$  – значение эксплуатационного параметра номинального режима расчетной винтовой характеристики.

На рис. 4 представлены зависимости относительного изменения давлений в характерных точках цикла от относительной мощности дизеля, а именно: давления наддува  $p_n$ , давления газа перед турбиной  $p_T$ , максимального давления по циклу дизеля  $p_z$ .

Переход на утяжеленную характеристику приводит к снижению частоты вращения коленчатого вала, в результате чего уменьшается расход газа и, как следствие, падает мощность турбины и компрессора. Это вызывает уменьшение давления наддува, которое составляет 1,3%. При этом снижается и давление газа перед турбиной. Для получения заданной мощности дизеля при пониженном расходе воздуха увеличивалась цикловая подача топлива, что вызвало повышение максимального давления цикла.

На рис 5 приведены зависимости относительного изменения температуры в характерных точках цикла от относительной мощности дизеля: температуры газа перед турбиной  $T_t$ , максимальной температуры цикла  $T_z$ , температуры газа в конце процесса расширения в цилиндре  $T_b$ . Исследования показали, что переход на более утяжеленную характеристику сопровождается повышением температуры по газовому тракту, что может отразиться на показателях тепловой напряженности дизеля [10].

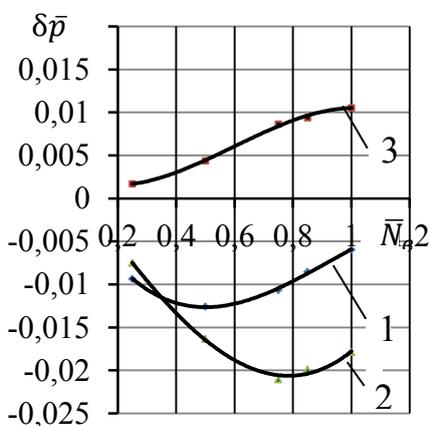


Рис. 4. Относительное изменение давления в характерных точках цикла:  
1 -  $p_n$ ; 2 -  $p_T$ ; 3 -  $p_z$

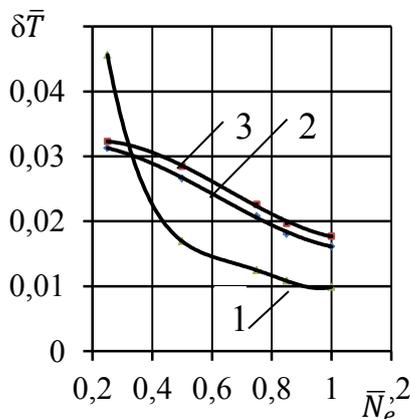


Рис. 5. Относительное изменение температуры в характерных точках цикла:  
1 -  $T_t$ ; 2 -  $T_z$ ; 3 -  $T_b$

На рис. 6 представлены зависимости относительного изменения эксплуатационных параметров дизеля от относительной мощности: коэффициента избытка воздуха при горении  $\alpha$ , мощности турбины турбокомпрессора  $N_T$ , удельного эффективного расхода топлива  $g_e$ . Снижение расхода газа при утяжелении винтовой характеристики вызывает уменьшение коэффициента избытка воздуха при горении топлива, которое составляет от 2,5% до 4,5% в зависимости от нагрузки дизеля. Такое

изменение  $\alpha$  коррелируется с зависимостями изменения температуры по газовому тракту дизеля (см. рис.5).

Работа по винтовой характеристике режима буксирования сопровождается уменьшением мощности турбины турбокомпрессора, которое находится на уровне 1%. Снижение мощности турбины меньше понижения расхода газа, составляющего  $2,2\% \div 2,7\%$ . Это объясняется повышением температуры газа перед турбиной, в результате чего увеличивается располагаемая работа.

На рис. 7 представлены зависимости относительного изменения показателей механической и тепловой напряженности дизеля: максимальной скорости нарастания давления  $\gamma = dp/d\varphi$ , показателя теплонапряженности поршня (критерия Костина)  $K_p$ , показателя теплонапряженности цилиндра (критерия Камкина)  $K_c$ . Физическая сущность показателей напряженности дизеля, а также их зависимость от некоторых эксплуатационных параметров рассмотрены в работах [11], [12]. Перечень показателей, определяющих напряженное состояние дизеля достаточно большой. Ряд таких показателей, которые использовались для оценки диапазона допустимых режимов работы дизеля, рассмотрен выше (см. рис. 2): среднее эффективное давление цикла  $p_e$ , максимальное давление цикла  $p_z$ , температура газов за цилиндрами с учетом перемешивания с продувочным воздухом  $p_t$ , средняя температура газа за время цикла  $T_t$ , температура газов в конце процесса расширения в цилиндре  $T_b$ , определяющая тепловое состояние выпускного клапана [10].

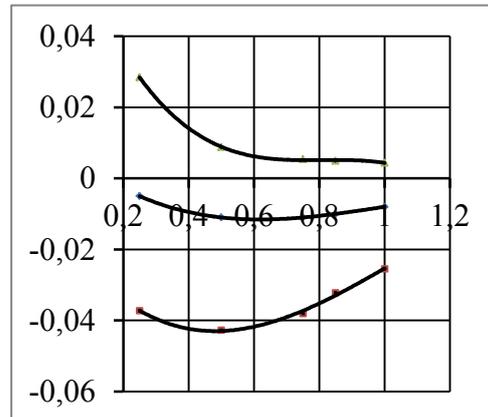


Рисунок 6 – Относительное изменение эксплуатационных параметров дизеля:  
1 –  $\alpha$ ; 2 –  $N_T$ ; 3 –  $g_e$

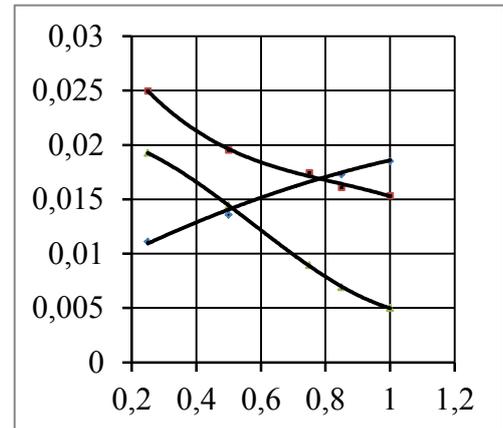


Рисунок 7 – Относительное изменение показателей напряженности дизеля:  
1 –  $\gamma$ ; 2 –  $K_p$ ; 3 –  $K_c$

Приведенные на рис. 7 зависимости критериев напряженности не являются приоритетными для определения зоны допустимых режимов судового дизеля, однако следует учитывать характер их изменения при проектировании и эксплуатации. Исследования показали, что переход на утяжеленную винтовую характеристику режима буксировки приводит к увеличению  $\gamma$ ,  $K_p$ ,  $K_c$ . Это следует учитывать при проектировании систем смазки ЦПГ.

### Выводы

Исследования главного двигателя буксир-толкача «Угличанин» показали, что работа состава буксир-баржа в режиме буксировки соответствует более утяжеленной винтовой характеристике по сравнению с режимом толкания, что может привести к перегрузке двигателя по ряду показателей.

Для исключения механической перегрузки двигателя в режиме буксировки его относительная максимально допустимая частота вращения не должна превышать  $\bar{n}=0,77$ , в то время как для режима толкания такая частота составляет  $\bar{n}=0,8$ .

Работа состава в режиме толкания не будет иметь перегрузок по средней температуре рабочего тела за время цикла дизеля  $T_r$  для диапазона допустимых режимов по механической напряженности, ограниченных характеристикой  $p_e = const$  ( $M_e = const$ ). В режиме буксировки при  $\bar{n} > 0,75$  дизель будет работать с повышенной  $T_r$ , что может негативно отразиться на смазке деталей ЦПГ.

Характеристики, соответствующие максимальной температуре цикла  $T_z$  и температуре газа в конце процесса расширения в цилиндре  $T_b$  могут выполнять роль ограничительных характеристик  $T_z = const$  ( $T_b = const$ ), так как их увеличение приводит к повышенным термическим напряжениям в деталях ЦПГ по причине увеличения перепада температур между газом и охлаждающей водой. В свою очередь, повышение  $T_b$  увеличивает температуру выпускного клапана, что может привести к его перегреву

#### Список литературы

1. Егоров Г.В. и др. Анализ состояния и путей развития внутреннего водного транспорта России. Речной транспорт (XXI век). 2021. №3 (99). С. 39-44.
2. Богданов Б.В. и др. Буксирные суда (проектирование и конструкция). - Л.: Судостроение 1974, 280 с.
3. Васильев А.В., Савинов В.Н., Егоров П.Н. Гидродинамика судов внутреннего плавания, часть 1. Расчет судов внутреннего плавания: Учебное пособие. 2-е изд. перераб. и доп. - Н. Новгород, НГТУ, 1996, 147 с.
4. Войткунский Я.И., Першиц Р.Я., Титов И.А. Справочник по теории корабля: Судовые движители и управляемость. 2-е изд. перераб. и доп. - Л.: Судостроение, 1973, 511 с.
5. Самсонов С.В. Основы теории судна. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2002, 100 с.
6. Камкин С.В., Возницкий И.В., Шмелев В.П. Эксплуатация судовых дизелей. Учебник для вузов. –М.: Транспорт, 1990. – 344 с.
7. Андрусенко С.Е. и др. Механизмы управления рабочим процессом дизельного двигателя. Научные проблемы водного транспорта. 2021. № 68. С. 98-108.
8. Вьюгов В.В. Расчет винтовых движителей судна. Методические указания по выполнению курсовых и дипломных проектов. – Новосибирск, НГАВТ, 2005, 39 с.
9. Свидетельство RU2022685277 Российская Федерация. Программа расчета параметров рабочего процесса дизеля с наддувом «Diesel K»: программа для ЭВМ / А.Н. Горбенко. – Опул. 22.12.2022, Бюл. №1.
10. Горб С.С., Сандлер А.К., Будуров Н.И. Повышение эффективности работы главного двигателя корректировкой упора гребного винта. Автоматизация судовых технических средств. Вып. 25, 2019, с. 35-52
11. Колюков В.Л. Анализ эксплуатационной напряженности четырехтактного дизеля при увеличении коэффициента избытка воздуха на долевых нагрузках. // Вестник Керченского государственного морского технологического университета, 2020, №2, - С.126-143
12. Колюков В.Л. Влияние коэффициента избытка воздуха при горении на показатели напряженности двухтактного дизеля в широком диапазоне режимов. Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2020. №3, pp. 54-63. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-3-54-63.

#### References:

1. Egorov G.V. i dr. Analiz sostoyaniya i putej razvitiya vnutrennego vodnogo transporta Rossi.[Analysis of the state and ways of development of inland water transport of the Russian Federation]. Rechnoj transport (XXI vek). [River transport (XXI century)]. 2021. №3 (99). P. 39-44. (In Russian).
2. Bogdanov B.V. i dr. Buxsirny'e suda (proektirovanie i konstrukciya). [Tugboats (design and construction)]- L.: Sudostroenie [L.: Shipbuilding] 1974, 280 p. (In Russian).

3. Vasil'ev A.V., Savinov V.N., Egorov P.N. *Gidrodinamika sudov vnutrennego plavaniya, chast' 1. Raschet sudov vnutrennego plavaniya: Uchebnoe posobie. 2-e izd. pererab. i dop.* [Hydrodynamics of inland navigation vessels, part 1. Calculation of inland navigation vessels: Textbook. 2nd ed. reprint. and add.] - N. Novgorod, NGTU, 1996, 147 p. (In Russian).
4. Vojtkunskij Ya.I., Pershicz R.Ya., Titov I.A. *Spravochnik po teorii korablya: Sudovy'e dvizhiteli i upravlyaemost'. 2-e izd. pererab. i dop.* [Handbook of Ship Theory: Ship Propulsion and Controllability. 2nd ed. reprint. and additional]. - L.: Sudostroenie, [L.: Shipbuilding], 1973, 511 p. (In Russian).
5. Samsonov S.V. *Osnovy' teorii sudna.* [Fundamentals of ship theory] – Vladivostok: Dal'ry'bvtuz, 2002, 100 p. (In Russian).
6. Kamkin S.V., Voznickij I.V., Shmelev V.P. *Ekspluatatsiya sudovyh dizelej* [Operation of marine diesel engines]. Moscow, Transport Publ., 1990, 344 p. (In Russian).
7. Andrusenko S.E. i dr. *Mexanizmy' upravleniya rabochim processom dizel'nogo dvigatelya.* [Mechanisms for controlling the working process of a diesel engine]. *Nauchny'e problemy' vodnogo transporta.* [Scientific problems of water transport]. 2021. № 68. P. 98-108. (In Russian).
8. V'yugov V.V. *Raschet vintovy'x dvizhitelej sudna. Metodicheskie ukazaniya po vy'polneniyu kursovy'x i diplomny'x proektov.* [Calculation of the ship's screw propellers. Methodological guidelines for the implementation of course and diploma projects]. – Novosibirsk, NGAVT, 2005, 39 p. (In Russian).
9. Svidetelstvo RU2022685277 Rossiyskaya Federatsiya. *Programma rascheta parametrov rabocheho protsessa dizelya s nadduvom «Diesel K» :programma dlya EVM* [Certificate RU2022685277 Russian Federation. The program for calculating the parameters of the working process of a supercharged diesel "Diesel K" :computer program] / A.N. Gorbenko. – Opubl. 22.12.2022. Byul. №1. (In Russian)
10. Gorb S.S., Sandler A.K., Budurov N.I. *Povysheniye effektivnosti raboty glavnogo dvigatelya korektyrovkoy upora grebnogo vinta.* [Improving the efficiency of the main engine by adjusting the propeller stop]. *Avtomatizatsiya sudovy'x tekhnicheskix sredstv: nauch.-texn. sb.* Odessa: ONMA. [Automation of ship technical means: scientific and technical sb. Odessa: ONMA.]. 2019. Vyp. 25. pp. 35-52 (In Russian)
11. Konyukov V.L. *Analiz e'ksplyuatsionnoj napryazhennosti chety'rekhtaktnogo dizelya pri uvelichenii koef'ficienta izby'tka vozduxa na dolevy'x nagruzkax.* [Analysis of the operational tension of a four-stroke diesel engine with an increase in the coefficient of excess air at shared loads]. // *Vestnik kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kerch State Marine Technological University], 2020, №2, -P126-143. (In Russian)
12. Konyukov V.L. *Vliyanie koef'ficienta izby'tka vozduxa pri gorenii na pokazateli napryazhennosti dvuxtaktnogo dizelya v shirokom diapazone rezhimov.* [Influence of the excess air coefficient during gorenje on the intensity indicators of two-stroke diesel in a wide range of modes]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaia tekhnika i tekhnologiya* [Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology], 2020, no. 3, pp. 54-63. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-3-54-63. (In Russian)

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS**

**Конюков Вячеслав Леонтьевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры судовых энергетических установок, Керченский государственный морской технологический университет, 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82, e-mail: seykgmtu@gmail.com

**Viacheslav L. Konyukov**, Ph.D. (Engin.), Associate Professor at the department of ship power plants, Kerch State Maritime Technological University, 298309, Republic of Crime, Kerch, Ordzhonikidze str., 82, e-mail: seykgmtu@gmail.com

Статья поступила в редакцию 26.04.2023; опубликована онлайн 20.06.2023.  
Received 26.04.2023; published online 20.06.2023.

УДК 621.039.542.5

DOI: 10.37890/jwt.vi75.359

## **Природный газ как альтернатива жидким углеводородам на судах с дизельной установкой**

**Ю.И. Матвеев**

**Н.А. Лаптев**

**В.В. Колыванов**

**М.Ю.Храмов**

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

**Аннотация.** В двигателях внутреннего сгорания (ДВС) различного назначения все чаще используют альтернативные виды топлива. Практика применения альтернативных топлив указывает на то, что их физико-химические свойства вносят значительные коррективы в способ организации рабочего процесса ДВС и весьма существенно влияют на эффективные и экологические показатели двигателя и всей энергетической установки в целом. Основной задачей проектирования энергетической установки с ДВС, работающей на синтез-газе, является обеспечение необходимой мощности, минимальной затраты топлива на различных режимах работы, а также минимальных выбросов вредных веществ в окружающую среду в зависимости от состава синтез-газа. Следует отметить, что более низкая удельная теплота сгорания синтез-газа по сравнению с традиционными сортами топлива (25...30 мДж/кг) приводит к значительному уменьшению мощности судового двигателя. Именно этот фактор и обуславливает использование синтез-газа в качестве добавки к традиционному топливу. Анализ имеющихся результатов и проведение моделирования процессов сгорания сжиженного природного газа на судах позволит спрогнозировать и определить дальнейшие пути повышения топливной эффективности, показателей мощности и экологии двигателей, работающих на этаноле с принудительным зажиганием.

**Ключевые слова:** двигатель, ДВС, природный газ, синтез-газ, топливо, альтернатива, углеводород, судно.

## **Natural gas as an alternative to liquid hydrocarbons on diesel-powered vessels**

**Yuriy I. Matveev**

**Nikolai A. Laptev**

**Vladimir V. Kolyvanov**

**Michael Y. Khramov**

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

**Abstract.** Alternative fuels are increasingly being used in internal combustion engines (ICE) for various purposes. The practice of using alternative fuels indicates that their physicochemical properties make significant adjustments to the way the internal combustion engine workflow is organized and have a very significant impact on the effective and environmental performance of the engine and the entire power plant as a whole. The main task of designing a power plant with an internal combustion engine running on synthesis gas

is to provide the necessary power, minimum fuel consumption in various operating modes, as well as minimum emissions of harmful substances into the environment, depending on the composition of the synthesis gas. It should be noted that the specific heat of combustion of synthesis gas is lower compared to traditional grades of fuel (25...30 MJ/kg), this leads to a significant reduction in the power of the marine engine. It is this factor that determines the use of synthesis gas as an additive to traditional fuel. Analysis of the available results and modeling of the combustion processes of liquefied natural gas on ships will allow to predict and determine further ways to improve fuel efficiency, power indicators and ecology of engines running on ethanol with forced ignition.

**Keywords:** engine, internal combustion engine, natural gas, synthesis gas, fuel, alternative, hydrocarbon, vessel.

### **Введение**

Исследование параметров работы энергетических установок малотоннажных судов при использовании спиртовых видов топлива с помощью численного моделирования параметров и характеристик рабочего процесса поршневого двигателя с принудительным зажиганием, а также работающих на этаноле при использовании термохимической утилизации теплоты отработанных газов, позволяет установить новые закономерности, уточнить механизм влияния параметров конверсии этанола в синтез-газ на топливную экономичность ДВС, а также оценить рациональные пределы использования системы утилизации.

Кроме того, математическое моделирование позволяет значительно снизить материальные затраты на исследования и получить достоверные результаты [1].

К биотопливу второго поколения относят топлива, получаемые путем пиролиза биомассы. Сырьем для биотоплива второго поколения являются лигно-целлюлозные соединения, содержащиеся в твердой биомассе в некоторых специально выращиваемых растениях и водорослях. В результате пиролиза получают горючие жидкости, из которых производят топлива, в том числе, и для судовых ДВС. Биотопливо второго поколения выпускают и продают канадская компания Dynamotive и SunDiesel и немецкая компания Choren Industries GmbH, однако объемы этих продаж на рынке энергетического топлива существенно не влияют на снижение спроса на газ [2].

Из приведенного выше анализа можно сделать вывод, что применение биологических топлив для судовой энергетики – вопрос далекой перспективы, в связи с чем нет необходимости рассматривать другие аспекты их использования в качестве альтернативного топлива для судовой энергетики. Вернуться к решению этих вопросов можно будет только после появления отработанных методов выработки биотоплива третьего поколения с морских биоресурсов [3]. В ближайшей перспективе имеющиеся биоресурсы будут направлены в первую очередь на нужды наземного транспорта, который наносит наибольший вред окружающей среде. Специфика эксплуатации морских судов позволяет, несмотря на значительные объемы вредных выбросов, рассеивать их на большие территории, что значительно снижает нагрузку на окружающую среду [4].

В краткосрочной перспективе задачи снижения стоимости перевозок и уменьшения негативного влияния на окружающую среду будут явно определяться и уже решаются за счет перевода части судовых двигателей на сжиженный природный газ (СПГ). Этот путь требует гораздо меньших затрат по сравнению с использованием традиционного топлива: (ТП)-газойлей, мазута, дизельного и моторного топлива и т.п. Однако, учитывая ограниченность запасов СПГ и их широкое использование на других видах транспорта, в энергетике и коммунальной сфере, последствия появления еще одного крупного потребителя, такого как торговый флот, на поведение газового рынка спрогнозировать достаточно сложно [1].

Наиболее перспективными газовыми топливами для использования на судах сегодня являются VOC, LNG и LPG, которые представляют собой: продукты испарения нефти в танках нефтеналивных танкеров, сжиженный природный газ или пропан - бутановые смеси [5].

Ужесточение экологических норм по содержанию в отработавших газах судовых малооборотных двигателей токсичных веществ и парниковых газов сделали использования природного и нефтяного газов привлекательной альтернативой традиционным моторным топливам, несмотря на дополнительные технические трудности, связанные с их применением [6]. Особенно проблема использования СПГ осложняется для малооборотных судовых двигателей (МОД) тем, что в силу особенностей организации рабочего процесса в двигателях данного класса возможно только внутреннее формирование на такте сжатия. Реализация рабочего процесса с внутренним образованием эмульсии связана с целым рядом проблем, решением которых с разной степенью успешности занимаются ведущие производители судовых малооборотных двигателей. Для других типов судовых дизелей уже есть вполне отработанные решения, что способствует широкому внедрению газовых и газодизельных двигателей в практику эксплуатации [7].

В долгосрочной перспективе для судовой энергетики представляют интерес ТП. Разработка технологий их использования требует гораздо больших финансовых затрат и времени на проведение исследовательских и опытно-конструкторских работ, однако позволит решить вопрос расширения топливной базы на значительно больший период, чем использование СПГ.

Следует отметить, что Р. Дизель был не первым, кто пытался достичь охлаждения заряда, используя поглощение теплоты за счет энергии фазового перехода. Явление поглощения и выделения теплоты при фазовом переходе из одного агрегатного состояния в другое широко используется в технике для накопления тепловой энергии с последующим ее использованием и стабилизации температурного состояния. Метод охлаждения заряда путем распыления воды в объеме рабочего цилиндра с последующим поглощением теплоты на фазовый переход из жидкой фазы в газообразное состояние использовался в первой половине прошлого века в калоризаторных двигателях и показал свою эффективность [8,9]. Учитывая то, что по характеру активации горения процессы в рабочем цилиндре ДВС и калоризаторных двигателях схожи, можно предположить, что охлаждение заряда будет эффективно влиять на рабочий процесс ДВС. Однако есть специфические особенности протекания процесса сжатия в цилиндре ДВС, которые необходимо учитывать при моделировании рабочего процесса [10].

Цель данной работы заключается в повышении эффективности энергетических установок малотоннажных судов при использовании спиртовых топлив; установлении влияния состава синтез-газа на основные параметры работы двигателя; определении рационального соотношения параметров рабочего процесса ДВС и параметров работы системы термохимической утилизации теплоты. Оптимизация вышеуказанных данных обеспечит приемлемые удельный расход топлива, мощность двигателя и его экологичность при определенных условиях эксплуатации.

### **Методы**

Для исследования изменения индикаторных показателей работы двигателя в зависимости от добавки синтез-газа к этанолу за основу был выбран двигатель 4С 10,16/9,1 (Volvo Penta), который широко применяется в малотоннажном судостроении.

Диапазон величины добавки синтез-газа к этанолу при исследовании составляет 1- 10% от массы этанола. Синтез-газ состоит из следующих основных компонентов: H<sub>2</sub> (43%), CO (34%) и CH<sub>4</sub> (23%). Расчетная удельная теплота сгорания синтез-газа составляет – 28,79 МДж/кг, плотность – 0,63 кг/м<sup>3</sup>. Значение коэффициента избытка

воздуха лежит в пределах 0,98...1,2. Основные параметры двигателя 4Ч 10,16/9,1 приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные параметры двигателя 4Ч 10,16/9,1

Параметр	Единица измерения	Значение
Тип	–	Стандартное
Рабочий объем	см <sup>3</sup>	2960
Диаметр цилиндра / ход поршня	мм	101,6/91,4
Количество цилиндров	–	4
Степень сжатия	–	9,2
Мощность	кВт	92
Максимальная частота вращения	об/мин.	4600
Норма токсичности	–	Евро-4

Изменение индикаторных показателей работы двигателя 4Ч 10,16/9,1 в зависимости от величины добавки синтез-газа к этанолу представлено на рис. 1 и рис. 2.

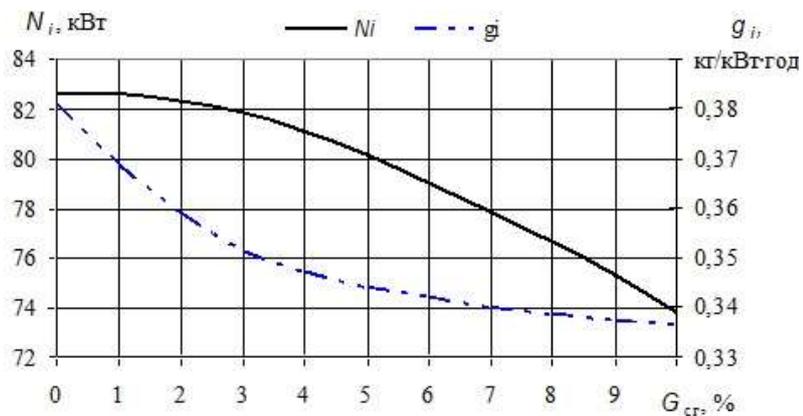


Рис. 1. Влияние величины добавки синтез-газа к этанолу на индикаторную мощность и индикаторный расход топлива двигателя 4Ч 10,16/9,1

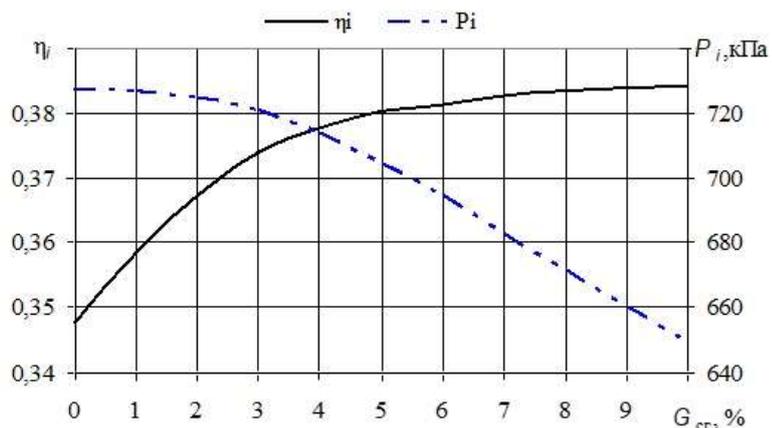


Рис. 2. Влияние величины добавки синтез-газа до этанола на индикаторный КПД и среднее индикаторное давление двигателя 4Ч 10,16/9,1

При работе двигателя на этаноле с добавками синтез-газа в зависимости от величины добавки наблюдается снижение индикаторной мощности с 82,6 до 73,8 кВт. Снижение мощности при этом составляет 10,6%, что является недостаточно

существенным. При этом наблюдается рост индикаторного КПД на 10,5% и снижение удельного индикаторного расхода топлива на 11,7%. В зависимости от величины добавки синтез-газа к этанолу 1...10% наблюдается снижение индикаторного давления и индикаторной работы цикла (рис. 3).

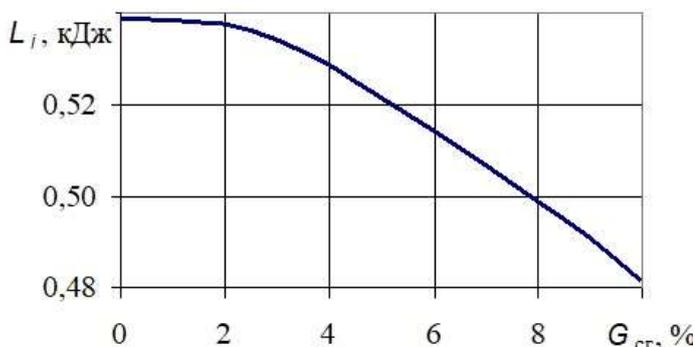


Рис. 3. Изменение индикаторной работы цикла двигателя 4Ч 10,16/9,1 в зависимости от величины добавки синтез-газа к этанолу

На рис. 4 приведены индикаторные диаграммы и диаграммы изменения температуры газов в цилиндре двигателя при работе на этаноле и с добавкой синтез-газа.

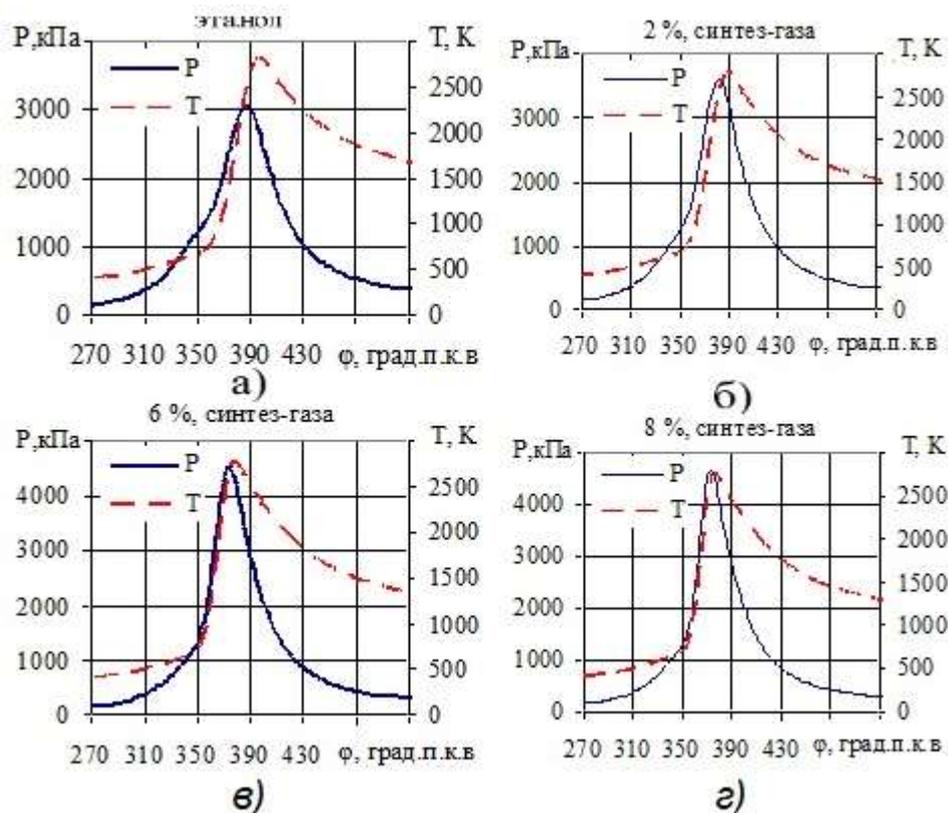


Рис. 4. Индикаторные диаграммы и диаграммы изменения температуры газов двигателя 4Ч 10,16/9,1 при работе: а – этанол; б – добавка синтез-газа 2%; в – добавка синтез-газа 6%; г – добавка синтез-газа 8%

Изменение максимального давления сгорания и температуры в зависимости от добавки синтез-газа представлено на рис. 5. Повышение давления сгорания при добавке синтез-газа до этанола объясняется увеличенной концентрацией водорода в топливе, а уменьшение продолжительности сгорания (рис. 6) – высокой скоростью сгорания топливоздушнoй смеси.

Максимальное значение давления сгорания (рис. 5) в зависимости от добавки находится в диапазоне 3,05...4,53 МПа, что соответствует допустимым значениям, необходимым для обеспечения механической прочности деталей кривошипно-шатунного механизма двигателя. При этом сгорание проходит спокойно, без резких нарастаний давления. В зависимости от добавки синтез-газа максимальная температура сгорания уменьшается на 4%, что, в свою очередь, положительно влияет на экологические показатели двигателя [11].

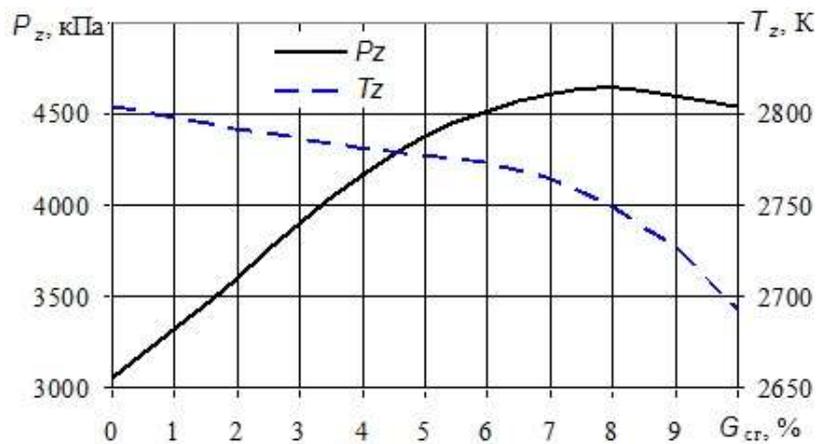


Рис. 5. Изменение максимального давления сгорания и температуры в зависимости от добавки синтез-газа к этанолу

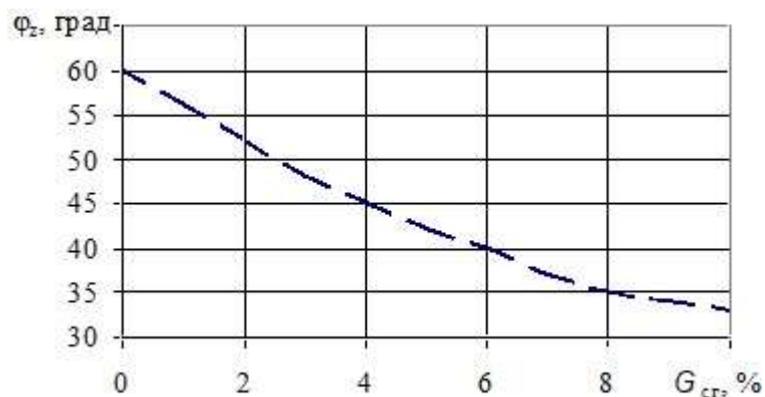


Рис. 6. Влияние величины добавки синтез-газа до этанола на продолжительность сгорания

### Результаты

Установлено, что при работе двигателя на этаноле с добавками синтез-газа 1...10% наблюдается снижение индикаторной мощности на 10,6% и снижение удельной индикаторной расхода топлива на 11,7%.

Добавка синтез-газа к этанолу уменьшает общую продолжительность сгорания смеси. Так, при величине добавки синтез-газа к этанолу 10%, для ДВС 4Ч 10,16/9,1 продолжительность сгорания снижается на 45%.

Добавки синтез-газа к этанолу улучшают экологические показатели работы двигателя. Это, прежде всего, связано со снижением максимальной температуры сгорания на 4%, а также применением коэффициента избытка воздуха в пределах 0,98...1,2.

#### Список литературы

1. Дмитриев, И.М. Преимущества использования сжиженного природного газа на судах в качестве топлива / И. М. Дмитриев, Н. В. Бархударов, А. А. Мусатов // Вестник научных конференций. – 2017. – № 8-2(24). – С. 28-29. – EDN ZHZAGB.
2. Муртазина, В.А. Тенденции и перспективы развития судов на сжиженном природном газе / В. А. Муртазина, Т. М. Муртазин // XXV Туполевские чтения (школа молодых ученых): Международная молодёжная научная конференция, посвященная 60-летию со дня осуществления Первого полета человека в космическое пространство и 90-летию Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ. Материалы конференции. Сборник докладов. В 6-ти томах, Казань, 10–11 ноября 2021 года. – Казань: Индивидуальный предприниматель Сагиева А.Р., 2021. – С. 348-351. – EDN YVYUGG.
3. Новиков, В.К. Научно-методические основы обеспечения экологической и пожарной безопасности судна водного транспорта, работающего на сжиженном природном газе / В. К. Новиков // Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции «Современные научные исследования: актуальные проблемы и тенденции». «Речной Форум 2019», Омск, 19–20 декабря 2019 года / Министерство транспорта Российской Федерации Федеральное агентство морского и речного транспорта, Омский институт водного транспорта - филиал ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта». – Омск: Омский институт водного транспорта (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Сибирский государственный университет водного транспорта", 2019. – С. 169
4. Рожков, М.А. Переход судов на сжиженный природный газ / М. А. Рожков, Е. А. Чабанов // Транспорт: проблемы, цели, перспективы (транспорт 2020): МАТЕРИАЛЫ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ, Пермь, 15 февраля 2020 года / Под редакцией Е.В. Чабановой. – Пермь: Пермский филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Волжский государственный университет водного транспорта", 2020. – С. 120-124. – EDN CAEMGO.-175. – EDN GCGHFV.
5. Волынцев А.В., Соболенко А.Н. Повышение энергоэффективности морского судна посредством использования природного газа и утилизации теплоты главного дизеля // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Материалы II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2019. – С. 17-19. – EDN PRVPLX.
6. Степанов, М.Д. Особенности применения сжиженного природного газа на судах водного транспорта / М. Д. Степанов, В. К. Новиков // Будущее машиностроения России : Сборник докладов Двенадцатой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием), Москва, 24–27 сентября 2019 года. – Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2019. – С. 654-656. – EDN MZWMIB.
7. Хасанов, И.И. Особенности бункеровки топлива для судов на сжиженном природном газе / И. И. Хасанов, А. Р. Гимаева // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2017. – № 3. – С. 19-22. – EDN YWJKIR.
8. Дмитриев, И. М. Анализ использования и сжижения природного газа на судах / И. М. Дмитриев, Н. В. Бархударов, А. А. Мусатов // Вестник научных конференций. – 2017. – № 8-2(24). – С. 27-28. – EDN ZHZAFR.

9. Матуш, Д.И. Использование природного газа как альтернативного топлива для судов морского и речного транспорта / Д. И. Матуш // *Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации : сборник статей XIX Международной научно-практической конференции* : в 2 ч., Пенза, 15 января 2019 года. – Пенза: "Наука и Просвещение" (ИП Гуляев Г.Ю.), 2019. – С. 103-105. – EDN YTMUTL.
10. Афанасьев П.М. Применение пакета FDS для моделирования и исследования процессов горения сжиженного природного газа на судах // Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова. – 2020. – Т. 1. – С. 4-8. – EDN KGVVFN.
11. Медведев, Г.В., Храмов, М.Ю. ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА КАЧЕСТВО ИХ ОЧИСТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КАТАЛИТИЧЕСКОЙ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ / Медведев, Г.В., Храмов, М.Ю. // *Научные проблемы водного транспорта*, (62), 167-174. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.47>

#### References

1. Dmitriev, I.M. Preimushchestva ispol'zovaniya szhizhennogo prirodnogo gaza na sudakh v kachestve topliva / I. M. Dmitriev, N. V. Barkhudarov, A. A. Musatov // *Vestnik nauchnykh konferentsii*. – 2017. – № 8-2(24). – S. 28-29. – EDN ZHZAGB.
2. Murtazina, V.A. Tendentsii i perspektivy razvitiya sudov na szhizhennom prirodnom gaze / V. A. Murtazina, T. M. Murtazin // *XXV Tupolevskie chteniya (shkola molodykh uchenykh): Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferentsiya, posvyashchennaya 60-letiyu so dnya osushchestvleniya Pervogo poleta cheloveka v kosmicheskoe prostranstvo i 90-letiyu Kazanskogo natsional'nogo issledovatel'skogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva-KAI. Materialy konferentsii. Sbornik dokladov. V 6-ti tomakh, Kazan', 10–11 noyabrya 2021 goda*. – Kazan': Individual'nyi predprinimatel' Sagieva A.R., 2021. – S. 348-351. – EDN YVYUGG.
3. Novikov, V.K. Nauchno-metodicheskie osnovy obespecheniya ehkologicheskoi i pozharnoi bezopasnosti sudna vodnogo transporta, rabotayushchego na szhizhennom prirodnom gaze / V. K. Novikov // *Sbornik trudov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sovremennye nauchnye issledovaniya: aktual'nye problemy i tendentsii»*. «Rechnoi Forum 2019», Omsk, 19–20 dekabrya 2019 goda / Ministerstvo transporta Rossiiskoi Federatsii Federal'noe agentstvo morskogo i rechnogo transporta, Omskii institut vodnogo transporta - filial FGBOU VO «Sibirskii gosudarstvennyi universitet vodnogo transporta». – Omsk: Omskii institut vodnogo transporta (filial) federal'nogo gosudarstvennogo byudzhethnogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego obrazovaniya "Sibirskii gosudarstvennyi universitet vodnogo transporta", 2019. – S. 169
4. Rozhkov, M.A. Perekhod sudov na szhizhennyi prirodnyi gaz / M. A. Rozhkov, E. A. Chabanov // *Transport: problemy, tseli, perspektivy (transport 2020): MATERIALY VSEROSIISKOI NAUCHNO-TEKHNICHESKOI KONFERENTSII, Perm', 15 fevralya 2020 goda / Pod redaktsiei E.V. Chabanovoi*. – Perm': Permskii filial Federal'nogo gosudarstvennogo byudzhethnogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego obrazovaniya "Volzhskii gosudarstvennyi universitet vodnogo transporta", 2020. – S. 120-124. – EDN CAEMGO.-175. – EDN GCGHFV.
5. Volyntsev A.V., Sobolenko A.N. Povyshenie ehnergoehffektivnosti morskogo sudna posredstvom ispol'zovaniya prirodnogo gaza i utilizatsii teploty glavnogo dizelya // *Molodezh' i nauka: aktual'nye problemy fundamental'nykh i prikladnykh issledovaniy: Materialy II Vserossiiskoi natsional'noi nauchnoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh. Komsomol'skii-na-Amure gosudarstvennyi universitet*, 2019. – S. 17-19. – EDN PRVPLX.
6. Stepanov, M.D. Osobennosti primeneniya szhizhennogo prirodnogo gaza na sudakh vodnogo transporta / M. D. Stepanov, V. K. Novikov // *Budushchee mashinostroeniya Rossii : Sbornik dokladov Dvenadtsatoi Vserossiiskoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov (s mezhdunarodnym uchastiem)*, Moskva, 24–27 sentyabrya 2019 goda. – Moskva: Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni N.EH. Baubana (natsional'nyi issledovatel'skii universitet), 2019. – S. 654-656. – EDN MZWMIB.

7. Khasanov, I.I. Osobennosti bunkerovki topliva dlya sudov na szhizhenom prirodnom gaze / I. I. Khasanov, A. R. Gimaeva // Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya. – 2017. – № 3. – S. 19-22. – EDN YWJKIR.
8. Dmitriev, I.M. Analiz ispol'zovaniya i szhizheniya prirodnogo gaza na sudakh / I. M. Dmitriev, N. V. Barkhudarov, A. A. Musatov // Vestnik nauchnykh konferentsii. – 2017. – № 8-2(24). – S. 27-28. – EDN ZHZAFR.
9. Matush, D. I. Ispol'zovanie prirodnogo gaza kak al'ternativnogo topliva dlya sudov morskogo i rechnogo transporta / D. I. Matush // Fundamental'nye i prikladnye nauchnye issledovaniya: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovatsii : sbornik statei XIX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii : v 2 ch., Penza, 15 yanvarya 2019 goda. – Penza: "Nauka i Prosveshchenie" (IP Gulyaev G.YU.), 2019. – S. 103-105. – EDN YTMUTL.
10. Afanas'ev P.M. Primenenie paketa FDS dlya modelirovaniya i issledovaniya protsessov goreniya szhizhennogo prirodnogo gaza na sudakh // Molodezhnaya shkola-seminar po problemam upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh imeni A.A. Vavilova. – 2020. – T. 1. – S. 4-8. – EDN KGVVFN.
11. Medvedev, G.V., Khramov, M.Y. VOZDEISTVIE TEMPERATURY OTRABOTAVSHIKH GAZOV SUDOVYKH EHNERGETICHESKIKH USTANOVOK NA KACHESTVO IKH OCHISTKI S ISPOL'ZOVANIEM METODA KATALITICHESKOI NEITRALIZATSII / Medvedev, G.V., Khramov, M.Y. // Nauchnye problemy vodnogo transporta, (62), 167-174. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.47>

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**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](mailto: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](mailto:matveeveseu@mail.ru)

**Лаптев Николай Александрович**, аспирант кафедры Эксплуатации судовых энергетических установок, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: [laptevlina@gmail.com](mailto:laptevlina@gmail.com)

**Nikolai A. Laptev**, postgraduate student of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Water Transport Objects, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951, e-mail: [laptevlina@gmail.com](mailto:laptevlina@gmail.com)

**Колыванов Владимир Викторович**, к.т.н., доцент кафедры Эксплуатации судовых энергетических установок, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: [v.v.kolyvanov@yandex.ru](mailto:v.v.kolyvanov@yandex.ru)

**Vladimir V. Kolyvanov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951, e-mail: [v.v.kolyvanov@yandex.ru](mailto:v.v.kolyvanov@yandex.ru)

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

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

Статья поступила в редакцию 27.03.2023; опубликована онлайн 20.06.2023.  
Received 27.03.2023; published online 20.06.2023.

УДК 621.313.1/.3=811.111  
DOI: 10.37890/jwt.vi75.374

## **Исследование нетрадиционного возбуждителя зубчатого статора с помощью программного обеспечения методом конечных элементов**

**И.Л. Титов**

*ORCID: 0000-0003-3406-0813*

*Керченский государственный морской технологический университет, г. Керчь, Россия*

**Аннотация:** в данной статье мы исследуем нетрадиционную конструкцию возбуждителя, имеющего зубчатый статор. Основная цель состоит в том, чтобы проверить, может ли предлагаемая машина соответствовать рабочим параметрам, заданным спецификацией. Данная статья начинается с описания возбуждителя тока с выступающими полюсами и описания конструкции с зубцами.[1] Статор с зубцами также отличается тем, что изготовлен из недорогого ферромагнитного материала, такого как чугун. При выборе чугуна руководствуются тем фактом, что он уже используется в промышленности в других компонентах генераторов переменного тока, таких как подшипники и некоторые соединительные втулки. Использование чугуна также позволяет снизить потери на вихревые токи по сравнению с твердыми стальными деталями. Поскольку путь магнитного потока в статоре является трехмерным, исследование проводится с помощью программного обеспечения для 3D-расчета методом конечных элементов. Модель машины сравнивается с экспериментальными результатами, полученными на макете. Затем мы вносим изменения в геометрию машины, чтобы улучшить ее характеристики. В заключение балансируем конструкцию с зубчатой передачей. Полученные результаты позволяют установить хорошую согласованность готовой элементной модели с результатами испытаний.

**Ключевые слова:** нетрадиционная конструкция возбуждителя, зубчатый статор, экспериментальные результаты, 3D-расчета методом конечных элементов, испытание с диодным мостом.

## **Investigation of an unconventional exciter of a toothed stator using software with finite element method**

**Ivan L. Titov**

*ORCID: 0000-0003-3406-0813*

*Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russia*

**Abstract.** In this article we investigate an unconventional design of an exciter with a toothed stator. The main purpose is to check whether the proposed machine can meet the operating parameters given in the specification. This article begins with a description of a current exciter with protruding poles and a description of a design with teeth. The toothed stator is also different in that it is made of an inexpensive ferromagnetic material such as cast iron. The choice of cast iron is guided by the fact that it is already used commercially in other alternator components such as bearings and some connecting bushings. The use of cast iron also reduces eddy current losses compared to solid steel parts. Since the path of the magnetic flux in the stator is three-dimensional, the study is carried out using software for 3D finite element calculation. The machine model is compared with the experimental results obtained on the layout. Then we make changes to the geometry of the machine to improve its

characteristics. In conclusion, we balance the design with a gear train. The obtained results allow us to establish a good consistency of the finished element model with the test results.

**Keywords:** unconventional exciter design, toothed stator, experimental results, 3D finite element calculation, load test with a diode bridge.

**Описание машины**

Система возбуждения промышленных генераторов переменного тока. состоит из возбудителя и вращающегося выпрямителя, который питает обмотку ротора. Возбудитель представляет собой так называемую инвертированную машину, в которой статор или индуктор имеют выступающие полюса, а ротор или якорь содержат трехфазную обмотку, соединенную с вращающимся выпрямителем.[2] На рисунке 1 показана текущая структура возбудителя.

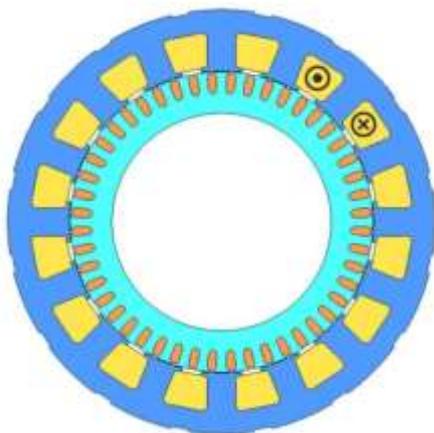


Рис. 1. Текущая структура возбудителя

Основные характеристики исследуемой машины (возбудитель генератора мощностью 600 кВА) приведены в таблице 1. Критерий размеров возбудителей предъявляется спецификацией генераторов переменного тока для конкретных областей применения (производство электроэнергии на борту судов). Большинство компаний, отвечающих за квалификацию генераторов переменного тока, предусматривают, что генератор переменного тока с коротким замыканием должен обеспечивать в 3 раза больший номинальный ток машины, что подразумевает, что система возбуждения должна подавать на обмотку ротора в 3 раза больший ток возбуждения[3]. Сравнение между существующей структурой и нетрадиционной структурой проводится по этому критерию.

Таблица 1

**Характеристики существующего возбудителя**

Данные	Значение
Количество полюсов	16
Количество выемок	48
Диаметр отверстия [мм]	270
Внешний диаметр [мм]	379.5
Длина утюга [мм]	60
Скорость вращения [об / мин]	1500

Нетрадиционная структура возбудителя имеет ту же арматуру, что и у эталонного возбудителя. Внешний диаметр индуктора увеличен до 400 мм. Катушка

индуктивности образована двумя узлами, которые содержат зубцы (показаны синим цветом на рис.2 а)) и внутри которых остается место для тороидальной общей обмотки (показаны желтым). Все когти в одном наборе имеют одинаковую полярность, в то время как когти в другом наборе имеют противоположную полярность. На рисунке 2 б) показана схема траекторий потока в машине. Эти траектории носят трехмерный характер[4]. Они имеют радиальную форму в воздушном зазоре, проходят в осевом направлении по зубцам и проходят через головку блока цилиндров статора с окружным и осевым компонентом. Траектории движения ротора такие же, как в машине с радиальным потоком.

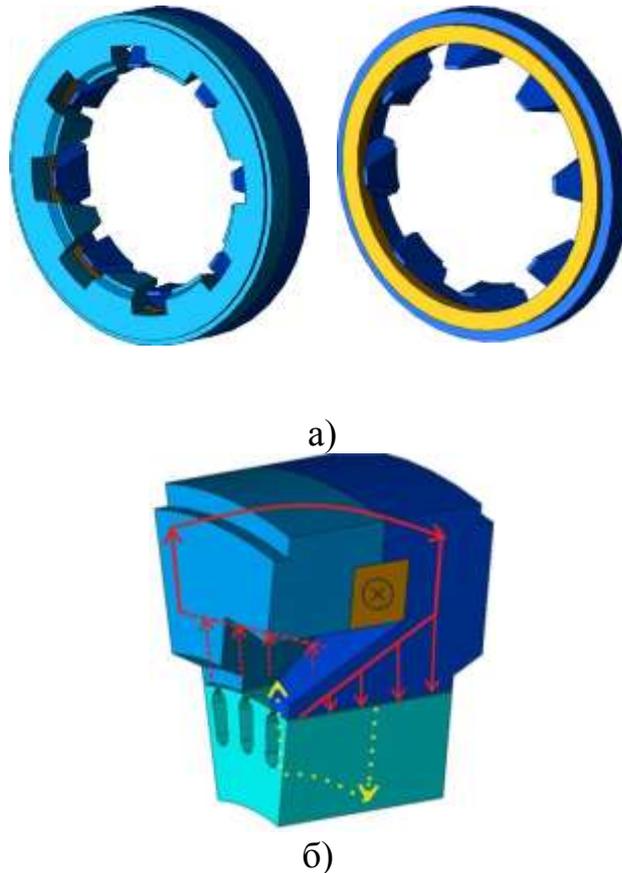


Рис. 2. Конструкция возбuditеля с зубчатым статором: (а) детали индуктора и (б) траектории линий потока в конструкции

**Преимущество этого типа конструкции кратко изложена ниже:**

- Количество деталей, необходимых для формирования статора, уменьшено по сравнению с обычным статором.
- Процессы изготовления и сборки массивных ферромагнитных деталей проще, чем для конструкций со штабелированием из листового металла.
- Использование общей намотки упрощает изготовление и позволяет иметь высокий коэффициент заполнения, попутно устраняя недостатки, присущие головкам катушек[5].

С другой стороны, индуктор изготовлен из недорогого материала, такого как чугун. Выбранным эталоном является чугун со сфероидальным графитом FGS 400-15. Чугуны из сфероидального графита обладают магнитными свойствами, которые являются лучшими среди чугунов (Калибр 01) Они также используются при

производстве тормозных двигателей (LS03). При выборе чугуна руководствуются тем фактом, что он уже используется в промышленности в других компонентах генераторов переменного тока, таких как подшипники и некоторые соединительные втулки. С другой стороны, реализация массивных деталей из чугуна проста и облегчает сборку индуктора.

При сравнении магнитных свойств с другими ферромагнитными материалами, используемыми в электрических машинах, чугун демонстрирует более низкие характеристики. Чтобы проиллюстрировать это, кривые  $B(H)$  чугуна, листового металла М600 и текущий эталонный показатель SMC сравниваются на рис. 3. можно заметить, что с точки зрения относительной проницаемости и поляризации насыщения листовая металл М600 имеет одни из лучших показателей. Относительная проницаемость рассматриваемого эталона SMC аналогична проницаемости сплава, но поляризация SMC при насыщении ( $J_s$ ) выше. Поляризация при насыщении этого эталона плавления составляет  $J_s = 1,55T$ .

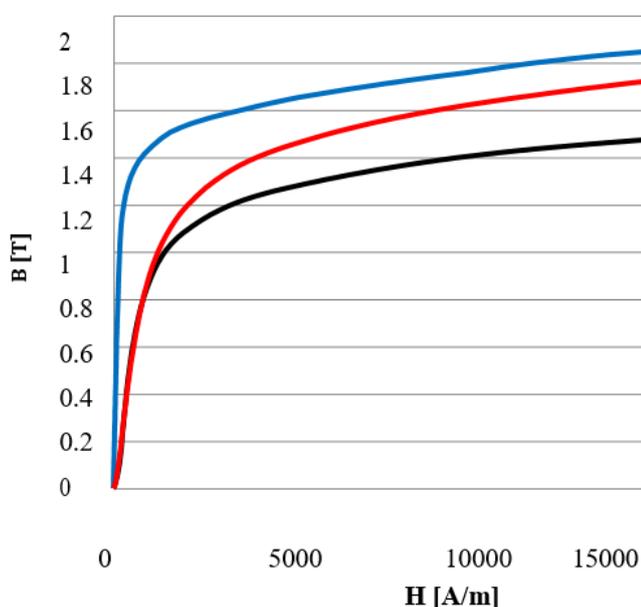


Рис. 3. Магнитные характеристики чугуна FGS 400-15 (черный цвет), магнитного листового металла М600(синий) и SMC 700 3P(красный).

Использование чугуна также позволяет снизить потери на вихревые токи по сравнению с твердыми стальными деталями. Это связано с его более высоким удельным электрическим сопротивлением ( $\rho$  чугуна =  $0.5 \mu\Omega \cdot m$  в то время  $\rho$  стали =  $0.3 \mu\Omega \cdot m$ ).

#### **Проверка результатов 3D-модели расчета методом конечных элементов**

Программное обеспечение, выбранное для анализа структур в 3D – это JMAG. Это исследование возбудителя с зубцами было нашим первым использованием электромагнитного 3D-инструмента конечных элементов. Первым шагом является проверка результатов расчетов методом конечных элементов путем сравнения их с результатами испытаний макета чугунного возбудителя. Изображение макета приведено на рисунке 4.



Рис. 4. Макет возбудителя с зубцами

Проверка 3D-модели EF выполняется для нескольких режимов:

- Работа без нагрузки
- Работа при коротком замыкании
- Работа с проточным выпрямителем на однофазной нагрузке
- Работа с проточным выпрямителем на обмотке Ротора главного генератора

Все моделирование было выполнено с помощью магнитопереходного анализа в 3D-инструменте с моделью конечных элементов, подключенной к электрической цепи. В модели конечных элементов головки катушек якоря не были показаны. Питание индуктора осуществляется от источника тока. Обмотка якоря подключена к трехфазной резистивной нагрузке, значение которой представляет собой разомкнутую цепь ( $R = \infty$ ) или короткое замыкание ( $R = 0$ ). Для режимов работы с выпрямительным мостом мы решили использовать идеальные диоды. Роторная обмотка главного генератора представлена сопротивлением, что позволяет обеспечить быструю сходимость расчетов[6-8].

Производительность без нагрузки ( $R = \infty$ )

На рисунке 5 показаны эффективные значения составных напряжений как функции тока возбуждения в индукторе для испытаний и трехмерной модели конечных элементов.

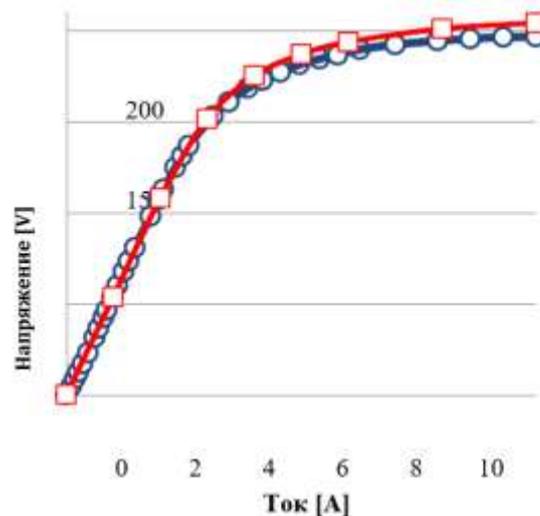


Рис. 5. Кривая без нагрузки (испытания красный, 3-d модель синяя)

Сравнение на линии воздушного зазора, линейной части кривой без нагрузки, является удовлетворительным. Когда мы находимся в нелинейной зоне, результаты моделирования находятся выше кривой, полученной в результате испытаний. Рисунок 6 позволяет сравнивать формы сигналов напряжения холостого хода как функцию времени. Мы используем два уровня тока возбуждения  $I_{exc} = 1\text{ A}$  (находится справа от воздушного зазора) и  $I_{exc} = 5\text{ A}$  (находится в зоне насыщения).

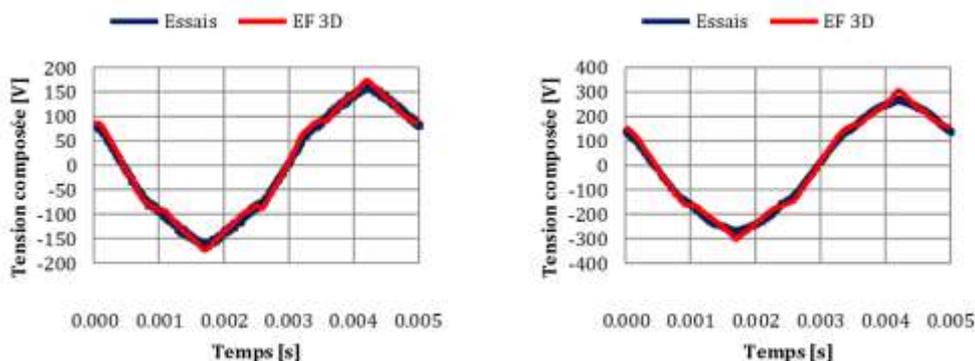


Рис. 6. Формы сигналов напряжения холостого хода

Характеристики при коротком замыкании ( $R = 0$ ) На этот раз сравнения проводятся по току в обмотке. На рисунке 7 показана эволюция эффективных значений тока якоря в зависимости от тока возбуждения в индукторе.

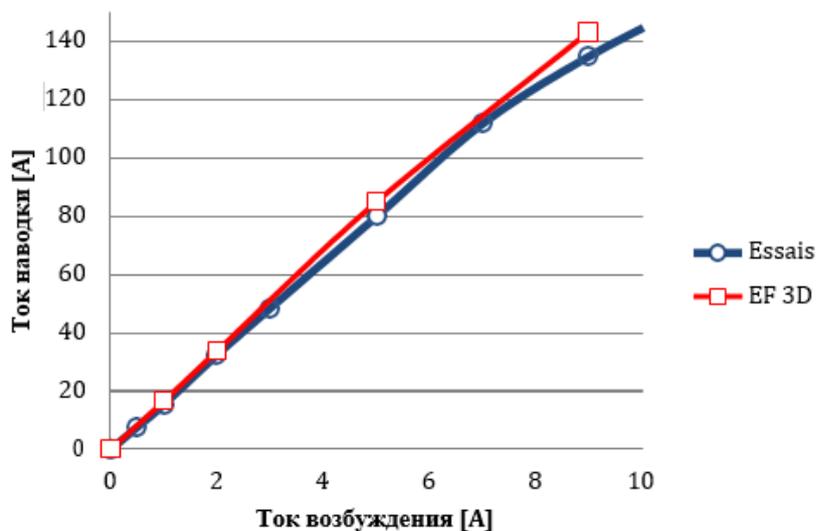


Рис. 7. Характеристика при коротком замыкании

Результаты близки к испытаниям, несмотря на отклонение при токе возбуждения при 9 А. Что касается форм сигналов тока якоря как функции времени, сравнения для двух уровней тока возбуждения (см. рисунок 8) также показывают хорошие результаты.

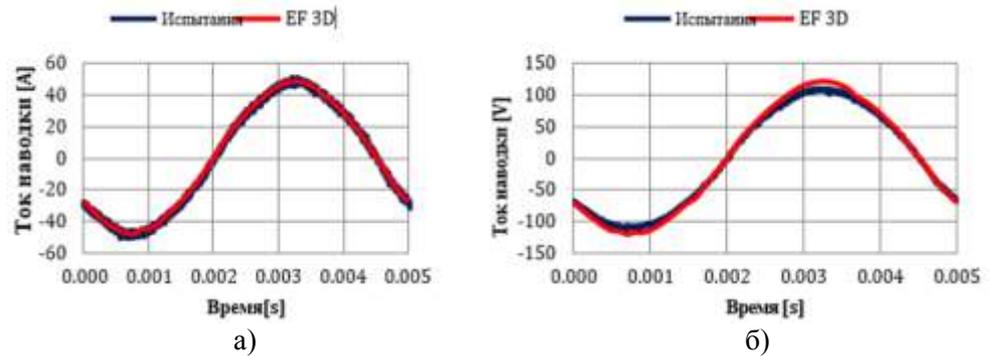


Рис. 8. Форма волны тока якоря при коротком замыкании для двух уровней тока возбуждения: (а) в линейной области  $I_{exc} = 2 \text{ A}$  и (б) в нелинейной области  $I_{exc} = 5 \text{ A}$ .

Производительность с выпрямительным мостом и однофазной нагрузкой. В этом случае обмотка якоря соединена с идеальным мостовым выпрямителем, который питает однофазную нагрузку[9]. Мы получаем среднее значение тока, протекающего через нагрузку. Мы построили кривую возбуждения для двух значений нагрузки,  $R = 9,5 \text{ ом}$  (рис. 9 (А)) и  $R = 14,5 \text{ ом}$  (рис. 9 (Б)). Результаты приемлемые.

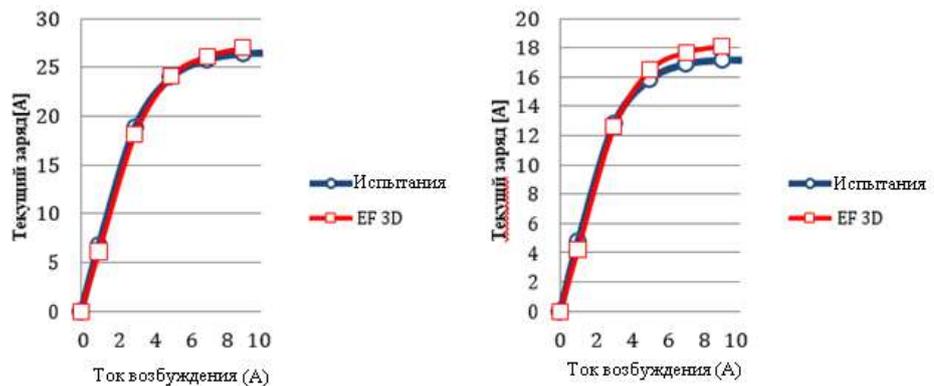


Рис. 9. Характеристики нагрузки возбудителя: испытание под нагрузкой с диодным мостом  $R = 9,5 \text{ ом}$  (а) испытание под нагрузкой с диодным мостом  $R = 14,5 \text{ ом}$  (б)

Характеристики с выпрямительным мостом, питающим обмотку ротора главного генератора.

Обмотка якоря соединена с диодным мостом и обмоткой главного генератора. В таблице 2 указаны отклонения в токе ротора между испытаниями и расчетами методом конечных элементов для двух точек измерения[10].

Таблица 2

Сравнение токов ротора между испытаниями и 3D-моделью для двух точек измерения.

	$I_{exc} = 9.6 \text{ A}$ Ток ротора [a]	$I_{exc} = 12 \text{ A}$ Ток ротора [a]
Испытания	139.8	145.4
EF 3D	144.9	151.6
Разница	3.6%	4.3%

### **Вывод**

Полученные при помощи исследования результаты позволяют установить хорошую согласованность готовой элементной модели с результатами испытаний. Таким образом, мы можем использовать их в качестве эталонного примера для изучения возможных улучшений в последующих исследованиях для получения более результативных значений. При использовании данных результатов в проектировании моделей могут быть достигнуты значения, более удовлетворяющие требованиям надежности, безотказности, повышенный КПД и др.

### **Список литературы**

1. Ю. Ван И З. Дэн, "Гибридные топологии возбуждения и стратегии управления статорными машинами с постоянными магнитами для систем питания постоянного тока". Труды IEEE по промышленной электронике том 59, № 12, стр. 4601-4616, декабрь 2012.
2. А. Тессароло, "Моделирование и анализ синхронных реактивных машин с круговыми барьерами потока посредством конформного отображения". IEEE Transactions on Magnetics, том 51, № 4, стр. 1-11, апрель 2015.
3. Г. Нейдхофер, "Эволюция синхронной машины". Журнал инженерных наук и образования, том 1, № 5, стр. 239-248, октябрь 1992.
4. О. Малоберти и др., "3-D–2-D динамическое магнитное моделирование двигателя с постоянным магнитом с осевым потоком с мягкими магнитными композитами для гибридных электромобилей". IEEE Transactions on Magnetics, том 50, № 6, стр. 1-11, июнь 2014.
5. Сахаров В.В., Чертков А.А., Сабуров С.В. Предиктивное апериодическое управление динамическими объектами на водном транспорте с использованием математического программирования. // Вестник государственного университета морского и речного флота им. Адмирала С.О. Макарова. 2016. № 5 (39). С. 206-214.
6. Д. К. Людуа, Дж. К. Рид и К. Хансон, "Емкостная передача мощности для тока возбуждения ротора в синхронных машинах". IEEE Transactions on Power Electronics, том 27, № 11, стр. 4638-4645, ноябрь 2012.
7. Й. Колемайнен, "Синхронный реактивный двигатель с ротором, заблокированным формой". IEEE Transactions on Energy Conversion, том 25, № 2, стр. 450-456, июнь 2010.
8. А. М. Найт, Р. Э. Бетц и Д. Г. Доррелл, "Проектирование и анализ бесщеточных реактивных машин с двойным питанием". IEEE Transactions on Industry Applications, том 49, № 1, стр. 50-58, январь- февраль 2013.
9. А. Г. Джек и др., "Машины с постоянными магнитами с сердечниками из порошкового железа и предварительно спрессованными обмотками". IEEE Transactions on Industry Applications, том 36, № 4, стр. 1077-1084, июль/август 2000.
10. П. Чжан, Г. Ю. Сизов, Д. М. Ионель и Н. А. О. Демердаш, "Установление относительных достоинств машин с постоянными магнитами внутреннего и спицевого типа с ферритом или NdFeB путем систематической оптимизации конструкции". IEEE Transactions on Industry Applications, том 51, № 4, стр. 2940-2948, июль-август 2015.

### **References**

1. Y. Wang and Z. Deng, "Hybrid Excitation Topologies and Control Strategies of Stator Permanent Magnet Machines for DC Power System". IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 12, pp. 4601-4616, Dec. 2012.
2. Tassarolo, "Modeling and Analysis of Synchronous Reluctance Machines With Circular Flux Barriers Through Conformal Mapping". IEEE Transactions on Magnetics, vol. 51, no. 4, pp. 1-11, April 2015.
3. G. Neidhofer, "The evolution of a synchronous machine". Journal of Engineering Sciences and Education, Volume 1, No. 5, pp. 239-248, October 1992.

4. O. Maloberti et al., "3-D-2-D dynamic magnetic simulation of a permanent magnet axial flow engine with soft magnetic composites for hybrid electric vehicles". IEEE Transactions on Magnetics, Volume 50, No. 6, pp. 1-11, June 2014.
5. Sakharov V.V., Chertkov A.A., Saburov S.V. Predictive aperiodic control of dynamic objects on water transport using mathematical programming. // Bulletin of the Admiral S.O. Makarov State University of Marine and River Fleet. 2016.No. 5 (39). pp. 206-214.
6. D. K. Ludua, J. K. Reed and K. Hanson, "Capacitive power transmission for rotor excitation current in synchronous machines". IEEE Transactions on Power Electronics, Volume 27, No. 11, pp. 4638-4645, November 2012.
7. J. Kolehmainen, "Synchronous Reluctance Motor With Form Blocked Rotor". IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 25, no. 2, pp. 450-456, June 2010
8. M. Knight, R. E. Betz and D. G. Dorrell, "Design and Analysis of Brushless Doubly Fed Reluctance Machines". IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 49, no. 1, pp. 50-58, Jan.- Feb. 2013.
9. G. Jack et al., "Permanent-magnet machines with powdered iron cores and prepressed windings". IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 36, no. 4, pp. 1077-1084, Jul/Aug 2000.
10. P. Zhang, G. Y. Sizov, D. M. Ionel and N. A. O. Demerdash, "Establishing the relative merits of machines with permanent magnets of internal and spoke type with ferrite or NdFeB by systematic design optimization." IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 51, No. 4, pp. 2940-2948, July-August 2015.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS**

##### **Титов Иван Леонидович**

К.т.н., доцент, заместитель декана по организационно-воспитательной работе, Керченский государственный морской технологический университет 298309, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82, vanya-titov-1993@mail.ru

##### **Ivan L. Titov**

Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, associate dean for organizational and educational work, Kerch State Maritime Technological University 298309, Kerch, Ordzhonikidze str., 82, vanya-titov-1993@mail.ru

Статья поступила в редакцию 02.05.2023; опубликована онлайн 20.06.2023.  
Received 02.05.2023; published online 20.06.2023.

## **ЭКОНОМИКА, ЛОГИСТИКА И МЕНЕДЖМЕНТ НА ТРАНСПОРТЕ**

### **ECONOMICS, LOGISTICS AND TRANSPORT MANAGEMENT**

УДК 338.2:656.07

DOI:10.37890/jwt.vi75.375

#### **Методические основы оценки качества транспортно- логистического обслуживания клиентов оператора морского терминала**

**М.В. Ботнарюк**

**Е.Ю. Грасс**

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

**Аннотация.** Цель настоящей статьи состоит в разработке методики оценки качества транспортно-логистического обслуживания операторов морских терминалов.

В работе раскрыты факторы, которые формируют качество транспортно-логистического обслуживания операторов морских терминалов в современных условиях. В результате проведенных исследований сформирована система комплексной оценки качества, позволяющая оценить степень удовлетворенности клиентов. Предложен новый подход к оценке качества, предполагающий вовлечение в формирование критериев качества клиентов, а также способ расчета и оценки нормативного уровня обобщающего показателя качества транспортно-логистического обслуживания клиентов оператора морского терминала. Практическая значимость разработанной методики состоит в том, что на ее основе появляется возможность оценить последствия реализации различных управленческих решений по улучшению бизнес-процессов операторов морских терминалов.

**Ключевые слова:** оператор морского терминала, качество, оценка, методика, транспортно-логистическое обслуживание

#### **Methodological bases for assessing the transport and logistics customer service quality of a marine terminal operator**

**Marina V. Botnaryuk**

**Elena Yu. Grass**

*Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russia*

**Abstract.** The purpose of this article is to develop a methodology for assessing the quality of transport and logistics services for operators of sea terminals.

The paper identifies the factors influencing the formation of the transport and logistics services quality in the activities of sea terminal marine operators in modern conditions. As a result of the conducted research, a system of comprehensive quality assessment has been formed, which allows assessing the degree of customer satisfaction. A new approach to quality assessment is proposed, involving the involvement of customers in the formation of quality criteria, as well as a method for calculating and evaluating the normative level of the generalizing indicator of the transport and logistics customer service quality of the sea

terminal. operator .The practical significance of the developed methodology is that on its basis it becomes possible to assess the consequences of implementing various management decisions to improve the business processes.

**Keywords:** sea terminal operator, quality, assessment, methodology, transport and logistics service.

### **Введение**

Проблемы эффективного управления качеством в сложных экономических условиях характерны практически для всех сфер экономики, в том числе для транспортной отрасли. Согласно Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 г., одной из целей развития транспортной системы России является повышение качества транспортного обслуживания, в том числе повышение качества транспортно-логистического обслуживания (ТЛО) [7].

Именно поэтому разработкой подобных вопросов занимаются многие исследователи. Например, в работе Кострова В.Н., Ничипорука А.О. и Сухарева Д.Н. [3] подчеркивается значимость разработки отраслевого стандарта в области мониторинга достижения целей в области качества на водном транспорте. В статьях Колбачева Е.Б. и Салько М.Г. рассматриваются вопросы управления качеством транспортного обслуживания [2,6]. Такие авторы, как Костров В.Н. и Тарактинова Е.М. анализируют особенности и вопросы развития транспортно-экспедиционного обслуживания мультимодальных перевозок с участием водного транспорта, что позволяет расширить информационную базу для определения с помощью контент-анализа факторов оценки качества транспортно-экспедиционного обслуживания [3,4]. Исследования Криворучко О.Н. и Поповой Н.В. также посвящены вопросам оценки качества транспортно-логистического обслуживания потребителей [5].

Вместе с тем, по мнению авторов, динамично изменяющаяся среда, появление новых способов транспортировки и перевалки грузов формируют предпосылки для развития стратегии соучастия клиентов в формировании системы оценки качества предлагаемых услуг, что повышает их ценность.

Вышеизложенное актуализирует совершенствование подходов к оценке качеством ТЛО и определяет необходимость в разработке методики оценки качества транспортно-логистического обслуживания операторов морских терминалов с учетом вовлечения в данный процесс потребителя услуг.

### **Методы и результаты исследования**

С целью получения научных результатов использовались общенаучные и специальные методы изучения: метод индукции и дедукции, а также традиционные методы экономического анализа, метод экспертных оценок, матричный метод, контент-анализ, анкетирование.

Цель состоит в разработке методики оценки качества транспортно-логистического обслуживания операторов морских терминалов.

В качестве объекта исследования выступают операторы морского терминала, которые оказывают услуги по перевалке груза, транспортно-экспедиторскому обслуживанию и информационному сопровождению перевозки грузов. В свою очередь, транспортно-логистические процессы на предприятиях морского транспорта включают: погрузо-разгрузочные работы, перемещение груза со склада отправителя, а также хранение и подготовку их к перевозке. В качестве отдельных операций стоит выделить оформление и рассылку транспортной, таможенной и иной грузовой и финансовой документации, транспортно-экспедиторское обслуживание. Предметом исследования являются показатели, характеризующие качество услуг операторов морского терминала.

Для определения новых направлений совершенствования применяемой сегодня системы оценки качества ТЛО авторами был проведен опрос, ключевой задачей которого стало определение основных показателей, под влиянием которых формируется уровень качества услуг, оказываемых операторами морского терминала. В качестве респондентов выступили менеджеры по работе с клиентами, которые находятся в постоянной связи с покупателями услуг и занимаются решением всех вопросов, связанных с качеством. В опросе принимали участие представители операторов морского терминала, расположенных на территории новороссийского морского порта, поскольку он является одним из крупнейших отечественных морских портов, через причальные фронты которого ежегодно проходит более 17% всего грузооборота России (рисунок 1).



Рис. 1. Удельный вес перегруженных грузов в порту Новороссийск в общем объеме перегруженных грузов в морских портах Российской Федерации, % (составлено по данным [1])

Все компании, сотрудники которых выступили в качестве респондентов, работают на данном рынке более десяти лет, удерживая достаточно устойчивые конкурентные позиции благодаря высокой деловой активности. Совокупная доля опрашиваемых компаний на исследуемом рынке составила 73%, что доказывает репрезентативность выборки.

Опираясь на полученные результаты, были определены основные показатели, влияющие на качество организации транспортно-логистического обслуживания клиентов:

- продолжительность погрузочно-разгрузочных работ;
- продолжительность оформления документов на прием и отправку груза;
- продолжительность обработки судовой документации по окончании подписания пакета документов морскими экспедиторами и представителями судовой администрации;
- скорость доставки пакета транспортных и финансовых документов клиентам терминала. В качестве пояснения отметим, что скорость доставки документов зависит от способа доставки: обычная почта, экспресс доставка, личный контакт с клиентом и т.д.;
- время на консультирование клиента по индивидуальным запросам (реализация клиентоориентированного подхода);
- сохранность груза (отсутствие повреждений и порчи груза, перегрузка грузов без потерь или в пределах значений норм естественной убыли).

Также экспертный опрос показал, что с целью максимального удовлетворения требований клиентов компаниям рекомендуется оказывать следующие дополнительные услуги: перетарка контейнеров, пакетирование и маркировка грузов, доработка поврежденных контрольных лент, хранение, оформление таможенной документации.

Отметим, что не каждая компания оказывает весь спектр обозначенных услуг. Учитывая изложенное выше, а также принимая во внимание жесткую конкурентную борьбу в сфере транспортно-логистического бизнеса на морском транспорте, считаем, что в каждой компании должна быть система оценки показателей качества оказываемых услуг, соответствующая их специфике и стратегическим целям компании.

При разработке новых подходов к оценке качества ТЛО для операторов морских терминалов под качеством следует понимать совокупность характеристик, свойственных конкретной услуге, которые удовлетворяют требованиям потребителей. В свою очередь, совокупность характеристик формируется индивидуально и учитывает не только потребности клиента, но и специфику предоставляемой услуги, которая может включать разные операции транспортно-логистического процесса. При этом для каждой характеристики рекомендуется устанавливать нормативные значения, которые зависят от возможностей продавца и учитывают пожелания покупателя. С целью определения степени качества нормативные значения должны сравниваться с фактическими, полученными в результате оказания услуги.

Как представляется авторам, подход к оценке качества ТЛО для операторов морских терминалов должен базироваться на процессном подходе, на принципах клиентоориентированности и сотворчества, партнерского взаимодействия и непрерывного улучшения качества ТЛО.

Процессный подход заключается в том, что характеристики качества должны быть сгруппированы в соответствии с операциями, которые составляют ТЛО. Принцип клиентоориентированности и сотворчества состоит в ориентации на пожелания клиента по каждой конкретной услуге, причем клиент в обязательном порядке должен быть привлечен к процессу формирования системы оценочных показателей качества.

Принцип партнерского взаимодействия нацелен на установление обратной связи с клиентом по результатам оказания услуг и оценки удовлетворенности качеством обслуживания. Принцип непрерывного улучшения качества ТЛО заключается в необходимости постоянного совершенствования системы качества.

Методика оценки качества, разработанная авторами, состоит из выполнения трех последовательных этапов (см.рис.2).

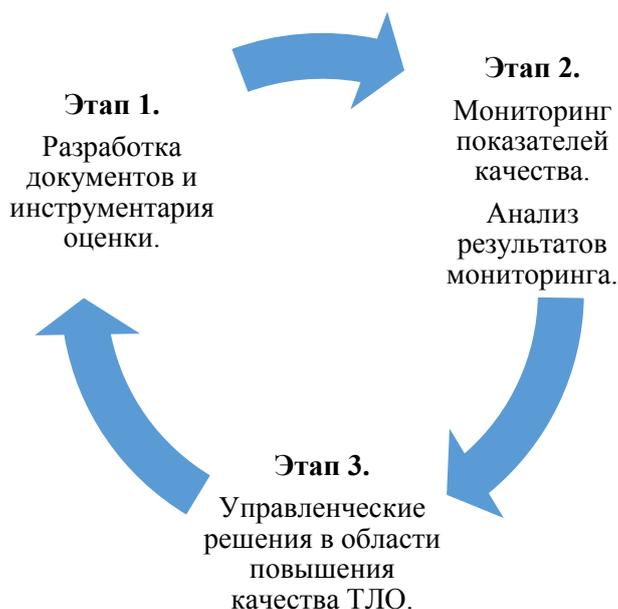


Рис. 2. Этапы оценки качества услуги ТЛЮ

Первый этап методики включает разработку документов (положений, в соответствии с которыми выполняется оценка качества услуг) и инструментария оценки. На этом этапе необходимо идентифицировать основные бизнес-процессы, определить совокупность показателей, характеризующих качество с учетом специфики услуги и пожеланий клиента (как в отношении набора показателей, так и их нормативных значений). Также определяются методы сбора и обработки информации.

Второй этап предполагает непосредственный мониторинг удовлетворенности потребителей по результатам оказания ТЛЮ и анализ результатов мониторинга. Мониторинг может проводиться путем общения с клиентами при личной встрече, по телефону или посредством анкетирования. По результатам анализа полученной информации производится оценка соответствия фактических значений показателей качества нормативным, что позволит определить уровень качества услуг. На третьем этапе разрабатываются управленческие решения в области повышения качества ТЛЮ, опирающиеся на полученные ранее результаты анализа. В таблице 1 представлены различные характеристики качества (частные показатели качества) бизнес-процесса в соответствии с оказываемой услугой, пожеланиями клиента, а также метод измерения и оценки.

Таблица 1

**Характеристики качества (частные показатели качества) бизнес-процесса операторов морского терминала**

Бизнес-процесс	Наименование показателя	Метод измерения и оценки
Погрузо-разгрузочные работы	Продолжительность погрузочно-разгрузочных работ на терминале	Хронометраж
Погрузо-разгрузочные работы	Сохранность груза	Оценка финансового убытка в случае повреждений, порчи,

		хищения груза. Взвешивание груза и оценка соответствия нормам естественной убыли.
Оформление и рассылка транспортной, таможенной и иной документации, связанной с грузом	Продолжительность оформления документов на прием и отправку груза	Хронометраж
Оформление и рассылка транспортной, таможенной и иной документации, связанной с грузом	Продолжительность обработки судовой документации по окончании подписания пакета документов морскими экспедиторами и представителями судовой администрации	Хронометраж
Транспортно-экспедиторское обслуживание	Время на консультирование клиента по индивидуальным запросам	Хронометраж
Оформление и рассылка транспортной, таможенной и иной документации, связанной с грузом	Скорость доставки пакета транспортных и финансовых документов клиентам терминала	Хронометраж
Погрузо-разгрузочные работы	Продолжительность погрузочно-разгрузочных работ на тыловой площадке	Хронометраж
Все бизнес-процессы	Удовлетворенность клиентов качеством компании	Анкетирование или опрос клиентов.
Хранение и подготовка их к морской перевозке	Возможность сегрегированного хранения	Да/нет
Хранение и подготовка их к морской перевозке	Наличие возможности смешения	Да/нет
Хранение и подготовка их к морской перевозке	Сохранность груза	Оценка финансового убытка в случае повреждений, порчи, хищения груза. Взвешивание груза и оценка соответствия нормам естественной убыли.
Погрузо-разгрузочные работы	Наличие возможности обработки нестандартных грузовых мест и транспортных средств	Да/нет
Перевозка груза со склада отправителя на склады, транспортно-экспедиторское обслуживание	Выгодная, удобная логистика	Анкетирование или опрос клиентов.
Хранение и подготовка их к перевозке	Наличие сервисных услуг: перетарка контейнеров, пакетирование и маркировка грузов, доработка поврежденных контрольных лент, хранение	Да/нет
Оформление и рассылка транспортной, таможенной и иной документации, связанной с грузом	Наличие услуг по оформлению	Да/нет

Для оценки удовлетворенности клиентов качеством услуг предлагается комплексный показатель, который оценивается через систему оценки баллов посредством проведения анкетирования (таблица 2).

Таблица 2

**Анкета оценки удовлетворенности клиентов качеством услуг**

№ п/п	Показатели качества	Критерии оценки		
		Отлично	Хорошо	Удовлетворительно
1.	Продолжительность погрузочно-разгрузочных работ на терминале	3	2	1
2.	Продолжительность оформления документов на прием и отправку груза	3	2	1
3.	Скорость доставки пакета транспортных и финансовых документов клиентам терминала	3	2	1
4.	Продолжительность обработки судовой документации	3	2	1
5.	Скорость реагирования на заявку клиента	3	2	1
6.	Уровень качества обслуживания	3	2	1
7.	Оцените уровень сохранности груза в процессе перегрузки	3	2	1
8.	Оцените уровень сохранности груза в процессе хранения и подготовке к морской перевозке	3	2	1
10.	Оцените на сколько Вы удовлетворены качеством оказания транспортно-логистических услуг в нашей компании.	3	2	1

По результатам анкетирования возможно определить удовлетворенность качеством клиентов компании через индекс качества, который рассчитывается как отношение фактической суммы баллов к максимально возможной сумме баллов. Авторы предлагают оценивать индекс следующей шкалой, где:

- 0,9-1,0 отличная оценка качества услуг;
- 0,8-0,9 хорошая оценка качества услуг;
- 0,7-0,8 удовлетворительная оценка.

Для проведения оценки по показателям качества предлагается составить обобщенную таблицу, в которой будут отражены характеристики качества, соответствующие отдельным бизнес-процессам и их нормативные значения, полученные в результате взаимодействия с клиентами (таблица 3). Значения весовых коэффициентов характеристик качества определяются экспертным путем. В качестве экспертов должны выступать не только менеджеры компании, но и клиенты.

Таблица 3

**Общая форма таблицы для расчета комплексного показателя качества услуг**

Показатели качества	Обозначение	Веса	База сравнения	Фактическое значение показателя	Индекс
Продолжительность погрузочно-разгрузочных работ на терминале	$K_1$				
Продолжительность	$K_2$				

оформления документов на прием и отправку груза					
...	...	...	...	...	...
Удовлетворенность клиентов качеством услуг	$K_n$				
Комплексный показатель качества ( $K_k$ )					

Алгоритм заполнения оценочной таблицы:

1. На первом этапе следует отобрать частные показатели качества. Их состав определяется актуальными в конкретный момент времени задачами, стоящими перед терминалом.
2. На втором этапе определяются веса значимости частных показателей качества.
3. На третьем этапе выбираем базу для сравнения, в качестве которой в зависимости от целей, задач, стратегий терминала можно установить норматив продолжительности выполнения работ оператором морского терминала, прописанный в договоре между исполнителем и клиентом. Также для сравнительной оценки можно проставить значения показателей качества, характерные для ключевых конкурентов терминала. Учитывая, что все терминалы являются коммерческими предприятиями, можно порекомендовать рассчитать и взять для сравнения среднеотраслевые значения показателей качества.
4. Далее рассчитывается индекс частного показателя качества по формулам (1) и (2). Если индекс частного показателя качества выше 1, то качество услуг высокое и наоборот.
5. На пятом этапе рассчитывается комплексный показатель качества по формуле (3).

Частный показатель качества рассчитывается как отношение «база сравнения/ фактическое значение показателя» и «фактическое значение показателя / база сравнения».

Если для терминала желаемым результатом является минимальное значение показателя, то в этом случае индекс частного показателя качества рассчитывается по формуле (1):

$$IK_i = K_i^{\phi} / K_i^{\delta} \tag{1}$$

В настоящей работе по формуле 1 далее произведен расчет индекса частных показателей качества для  $K_1, K_3, K_4$ .

Индекс частного показателя качества для  $K_2, K_5$  рассчитывается по формуле (2):

$$IK_i = K_i^{\phi} / K_i^{\delta} \tag{2}$$

Комплексный показатель качества рассчитывается по формуле (3):

$$KK = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot IK_i \tag{3}$$

где,  $KK$  - комплексный показатель качества;

$\omega_i$  - вес значимости частный показателя качества;

$IK_i$  - индекс частного показателя качества.

Если полученное значение комплексного показателя качества составляет 1 и более, то оператор морского терминала удовлетворяет критериям, предъявляемым со стороны покупателей терминальных услуг в области транспортно-логистического обслуживания. Если значения данного показателя менее 1, то оператору морского терминала необходимо проводить дополнительные исследования, направленные на выявление слабых мест в транспортно-логистическом обслуживании.

Далее приведем пример анкетирования клиентов. Результаты анкетирования и расчета критерия «Удовлетворенность клиентов качеством услуг» представлены в таблице 4.

Таблица 4

**Результаты анкетирования клиентов**

Клиент/Вопрос	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Норма	Факт	Индекс
Клиент 1	3	3	3	2	2	2	2	2	3	2	30	22	0,80
Клиент 2	3	2	2	3	3	2	3	3	2	2	30	23	0,83
Клиент 3	3	2	2	2	1	3	2	2	2	3	30	22	0,73
Клиент 4	3	3	3	2	2	2	3	3	2	2	30	23	0,83
Клиент 5	3	2	2	3	3	3	2	2	3	2	30	22	0,83
Критерий «Удовлетворенность клиентов качеством услуг»													0,81

Критерий «Удовлетворенность клиентов качеством услуг» рассчитывается как среднеарифметическое частных индексов качества по результатам анкетирования клиентов.

Ниже приведена таблица показателей качества бизнес-процесса «Погрузочно-разгрузочные работы» (погрузка груза на морское судно). Показатель «Сохранность груза в процессе перегрузки, %» определяется как удельный вес грузов, которые были перегружены в рамках норм естественной убыли, к общему количеству перегруженных грузов (таблица 5).

Таблица 5

**Оценка качества транспортно-логистического обслуживания**

Показатели качества	Веса	Норма	Факт	Частный показатель качества
Продолжительность погрузочно-разгрузочных работ на терминале, час (K1)	0,25	8	10,00	0,80
Сохранность груза в процессе перегрузки, % (K2)	0,25	100	95,00	0,95
Продолжительность оформления документов на прием и отправку груза, час (K3)	0,20	1	2,00	0,50
Скорость доставки пакета транспортных и финансовых документов клиентам терминала, час (K4)	0,15	48	52,00	0,92
Удовлетворенность клиентов качеством услуг (из табл.4) (K5)	0,15	1	0,81	0,81
Комплексный показатель качества ТЛО				0,80

Полученное значение комплексного показателя качества транспортно-логистического обслуживания (0,80) свидетельствует о неудовлетворительном результате работы. Невыполнение составляет 20%. Следует ускорить продолжительность оформления документов на прием и отправку грузов. Этот показатель имеет самое низкое значение (0,5).

На третьем этапе в соответствии с результатами анализа необходимо разработать и внедрить мероприятия, которые позволят устранить проблемные зоны, наличие которых снижает качество предлагаемых услуг.

### **Заключение**

В настоящей статье представлены новый подход и методика оценки качества ТЛО для операторов морских терминалов. Опираясь на результаты опроса, контента анализа, а также на результаты, полученные другими исследователями, авторы пришли к заключению, что на современном этапе необходимо активное включение в процесс оценки качества услуг конечного потребителя. В этой связи в рамках проведенного исследования предлагается:

- усовершенствованный подход к оценке качества ТЛО для операторов морских терминалов, опирающийся на процессный подход (возможность детального исследования качества отдельных операций ТЛО) и принципы клиентоориентированности и сотворчества, партнерского взаимодействия и непрерывного улучшения качества ТЛО;
- методика оценки качества, с помощью которой можно также оценить последствия реализации различных управленческих решений по улучшению бизнес-процессов, что будет способствовать завоеванию истинной лояльности клиентов.

### **Список литературы**

1. Ассоциация морских торговых портов. – URL: <https://www.morport.com/>
2. Колбачев Е.Б. Управление качеством транспортного обслуживания экономики и конкурентное сотрудничество // Вестник ЮжноРоссийского государственного технического университета (Новочеркасского политехнического института). Серия: Социально-экономические науки. – 2014. – № 6. – С. 57-62.
3. Костров В.Н., Ничипорук А.О., Сухарев Концепция формирования единого отраслевого порядка мониторинга достижения целей в области качества на водном транспорте // В сборнике: Актуальные решения проблем водного транспорта. Сборник материалов I Международной научно-практической конференции. Астрахань, 2022. – С. 311-315.
4. Костров В.Н., Тарактинова Е.М. Особенности и вопросы развития транспортно-экспедиционного обслуживания мультимодальных перевозок с участием водного транспорта // В сборнике: Транспорт: Проблемы, цели, перспективы (Transport 2021). Материалы II Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Под редакцией Е.В. Чабановой. Пермь, 2021. – С. 567-571.
5. Криворучко О.Н., Попова Н.В. Экономика транспортного комплекса // Оценка качества транспортно-логистического обслуживания потребителей 2018. № 31. С. 91-109.
6. Салько М.Г. Управление качеством и конкурентоспособностью компаний на рынке транспортно-логистического обслуживания: монография / Тюменский индустриальный университет. – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2021. – 163 с.
7. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года // Распоряжение Правительства РФ от 27.11.2021 №3363. М.: Правительство РФ, 2021. URL: <https://mintrans.gov.ru/file/473193>

### References

1. Association of Commercial Sea Ports. – URL: <https://www.morport.com/>
2. Kolbachev E.B. Quality management of transport services of the economy and competitive cooperation // Bulletin of the South Russian State Technical University (Novocherkassk Polytechnic Institute). Series: Social and Economic sciences. - 2014. – No. 6. – pp. 57-62.
3. Kostrov V.N., Nichiporuk A.O., Sukharev The concept of forming a unified sectoral order for monitoring the achievement of quality goals in water transport //In the collection: Current solutions to water transport problems. Collection of materials of the I International Scientific and Practical Conference. Astrakhan, 2022. – pp. 311-315.
4. Kostrov V.N., Taraktinova E.M. Features and issues of development of transportation and forwarding services for multimodal transportation involving water transport // In the collection: Transport: Problems, goals, prospects (Transport 2021). Materials of the II All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation. Edited by E.V. Chabanova. Perm, 2021. – pp. 567-571.
5. Krivoruchko, O.N., Popova, N.V. Economics of the transport complex // Assessment of the quality of transport and logistics services to consumers 2018. No. 31. pp. 91-109.
6. Salko, M.G. Quality management and competitiveness of companies in the market of transport and logistics services: monograph / Tyumen Industrial University. – Tyumen : Tyumen Industrial University, 2021. – 163 p.
7. Transport strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035 // Order of the Government of the Russian Federation dated 27.11.2021 No. 3363. Moscow: Government of the Russian Federation, 2021. URL: <https://mintrans.gov.ru/file/473193>

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ботнарюк Марина Владимировна**, доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры экономической теории, экономики и менеджмента, Государственный морской университет, 353924, Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: [mia-marry@mail.ru](mailto:mia-marry@mail.ru).

**Marina V. Botnaryuk**, Dr. Sci. (Econ.), Associate professor, Professor of the economic theory, economics and management Department, maritime state University, Lenin's avenue, 93, Novorossiysk, 353924, Russian Federation, e-mail: [mia-marry@mail.ru](mailto:mia-marry@mail.ru)

**Грасс Елена Юрьевна**, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры экономической теории, экономики и менеджмента, Государственный морской университет, 353924, Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: [grasss@list.ru](mailto:grasss@list.ru)

**Elena YU. Grass**, Cn. Sci. (Econ.), Associate professor, Associate professor of the economic theory, economics and management Department, maritime state University, Lenin's avenue, 93, Novorossiysk, 353924, Russian Federation, e-mail: [grasss@list.ru](mailto:grasss@list.ru)

Статья поступила в редакцию 05.04.2023; опубликована онлайн 20.06.2023.  
Received 05.04.2023; published online 20.06.2023.

УДК 338.242.2

DOI: 10.37890/jwt.vi75.361

## **Modernization of the transport system in the Asian-Russian sector as the basis for global economic restructuring security**

**Alexander I. Gavrilov<sup>1</sup>**

**Ivan I. Streltsov<sup>2</sup>**

**Wu Xiangyu<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Russian Academy of Engineering Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** The research in this article allows us to conduct a comparative assessment of the relationships between the intensification of innovative processes of development of transport, which largely determine today the main parameters of economic development efficiency of the respective regional territories and national states as a whole. The subject of the study is transport parameters of the movement of the resource component in space and time on the efficiency and competitiveness of the productive link of the regions and expanding the organization of trade relations of the subjects of the economy. Resources, the level of their territorial dispersion and dispersion with the possibility of placing productive forces and capacities, are largely determinant today in the development of the needs of the production sector and the impact of stock parameters on business efficiency and competitiveness of the economies of national states as a whole. Particular attention is paid to the development of both external interstate and internal national linear transport networks, including rail, road and water transport [1]

The relevance of this publication is confirmed by the active development of Russia's transportation corridors, including the "North-South" and "West-East" corridors, which will be of great importance in utilizing Russia's vast resource potential in the joint development of advanced corporate production facilities with national friendly states that possess modern production and human resources capabilities.

The scientific basis of this study is represented by complex analysis methods of generalization and evaluative expert assessments of the effect [2]

The main target parameters of the scientific justification of the article results are:

- Confirmation of the possibility of using the practices of advanced enterprises of developed Asian countries, which rely on the influence of freight delivery speed and minimization of commodity stocks in the manufacturing sector, on labor productivity and, as a result, on intensive growth of economic efficiency as a whole.
- Substantiation of the importance of integration processes between Russia and Asian countries through corporate participation in global innovative development of transportation routes, which will stimulate the intensification of the economy by actively developing communication between participating countries in the organization of transportation of raw materials and goods.

The scientific novelty of the study is determined by the justification for the need for comprehensive development of the transport system of Russia and Asian countries, in the current conditions of sanctions pressure and the reorientation of global markets. The hypothesis is that the modernization of transport arteries will be the basis for increasing labor productivity and forming an innovative transport support for the production potential of the country, not only through the supply of hydrocarbon raw materials to the West and Asia but through corporate participation in the development of an efficient transport infrastructure of the country in international business.

**Keywords:** Transport infrastructure; Corporate participation in international business; Innovative development of the regions of the country; Efficiency of the transport and production complex; Internal infrastructure potential; Labor productivity in transport; International transport cooperation; Intensification of the use of transport corridors; Innovative projects in transport; New world order.

## **Модернизация транспортной системы в азиатско-российском секторе как основа безопасности глобальной экономической реструктуризации**

**А.И. Гаврилов<sup>1</sup>**

**И.И. Стрельцов<sup>2</sup>**

**У Сяньюй<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Нижегородский институт управления Российской академии государственной службы при Президенте РФ, Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Волжский государственный университет водного транспорта г. Нижний Новгород, Россия*

**Аннотация.** Исследования в данной статье позволяют провести сравнительную оценку взаимосвязей интенсификации инновационных процессов развития транспортных перевозок, которые во многом определяют сегодня основные параметры эффективности развития экономики соответствующих региональных территорий и национальных государств. Предметом исследования выступают транспортные параметры перемещения ресурсной составляющей в пространстве и времени на эффективность и конкурентоспособность производственного звена регионов и расширения организации торговых связей субъектов экономики. Ресурсы, уровень их территориальной разбросанности и разрозненности с возможностью размещения производительных сил и мощностей, во многом являются сегодня определяющими в развитии потребностей производственного сектора и влияния параметров запасов на эффективность бизнеса и конкурентоспособность экономик национальных государств. Особое внимание при этом уделяется развитию как внешних межгосударственных, так и внутренних национальных линейных транспортных сетей включая железнодорожный, автомобильный и водный транспорт.

**Актуальность данной публикации** подтверждается поиском активного развития транспортных коридоров России «Север-юг», «Запад – восток», которые будут иметь важное значение в использовании огромного Российского ресурсного потенциала в совместном развитии корпоративных передовых производств национальных дружественных государств обладающих современными производственными и кадровыми возможностями.

Научной базой данного исследования выступают комплексные методы анализа обобщения и оценочных экспертных оценок эффекта.

**Основными целевыми параметрами научного обоснования результатов статьи являются:**

Подтверждение возможности использования практики передовых предприятий развитых стран Азии опирающихся на влияние скорости поставок грузов и минимизацию объемов товарных запасов в производственном секторе, на производительность труда и как следствие на интенсивный рост эффективности развития экономики регионов.

Обоснование важности интеграционных процессов России и стран Азиатского региона путем корпоративного участия в глобальном инновационном развитии путей транспортного сообщения, что будет стимулом для интенсификации экономики путем активного развития коммуникаций стран-участниц в организации перевозок сырья и товарной продукции.

Научная новизна работы определяется обоснованием необходимости комплексного корпоративного развития транспортной системы России и стран Азии, в современных условиях санкционного давления и переориентацией глобальных рынков.

Результаты исследования заключается в том, что модернизация транспортных артерий будет выступать основой повышения производительности труда и формирования инновационного корпоративного транспортного обеспечения производственного потенциала страны не только за счет поставок углеводородной составляющей сырьевых ресурсов на Запад и в Азию, а путем корпоративного участия в развитии эффективной транспортной инфраструктуры страны в международном бизнесе.

**Ключевые слова:** Транспортная инфраструктура; Корпоративное участие в международном бизнесе; Инновационное развитие регионов страны; Эффективность транспортно-производственного комплекса; Внутренний инфраструктурный потенциал; Производительность труда на транспорте; Международное транспортное сотрудничество; Интенсификация использования транспортных коридоров; Инновационные проекты на транспорте; Новый мировой порядок.

### **Introduction**

Despite the modern sanctions pressure from world countries trying to bring about comprehensive disorganization of the Russian economy, with a particular emphasis on limiting the supply of hydrocarbon raw materials to the West, there are reasons to address the issue of improving the efficiency of the country's economic development through the improvement of transportation infrastructure and joint corporate participation of the country in the transport and production business of developed countries in Asia, Africa, and Latin America. It is suggested that the reliance on the fact that sanctions that affect the reduction of the trade balance of participating countries in international cooperation as well as the reduction of currency sources for budget formation will put Russia in a dead end, which is obvious and unlikely.

The reduction of global hydrocarbon reserves, as well as the burdening possibility of their extraction and supply, as well as the catastrophic reduction of global hydrocarbon reserves, requires urgent solutions to the problems of finding alternative sources for the development of economies for most countries based on the development of new directions in international business. In our view, these directions could be nuclear energy as an alternative energy source, in which Russia has elements of a monopoly, and new forms of organization of international corporate business based on the corporatization of transport and production systems with the effective use of existing international production and personnel potential. [3-5]

One of such advantageous spheres is the transportation system of Russia, which serves as a connecting link between Asia, Europe, and Africa. It is the transportation infrastructure that determines the efficiency of many production processes and national systems today, playing a significant role in creating gross domestic product.

Infrastructure innovations in the transportation sector make the production process of many countries more competitive, efficient, optimized in terms of financial costs and time.

Based on the above, it is important to note that the role of the organizational innovation component in transportation is important, specifically in attracting interested corporate clients to participate in the joint development of cross-national transportation and production systems.

The placement of modern production facilities in Asia, India, and China, as well as the availability of qualified personnel, require closer proximity to sales markets that should be territorially accessible with minimal transportation costs delivered to consumers in Europe, Russia, and the Baltic countries. In addition, this is also the basis for increasing the mobility of labor resources between participating states in transport and production corporate systems, as well as within the participating states, which will create the opportunity to increase labor productivity.

In this case, a relatively inexpensive type of transport that connects the territories of countries is international and domestic road, rail, and water transport, which have received a new impetus for development in recent years. In addition, the southern and northern sea routes, as well as the planned alternative transport corridor to the "Silk Road" through the Caspian with the Mediterranean by constructing the Caspian-Black Sea canal, are also important.

To achieve these goals, the possibility of year-round use of water and rail transport is ensured, using innovative types of icebreakers and modern hovercraft.

To achieve the stated goal, the authors have identified the following tasks:

1. Defining an assessment methodological framework for establishing complex dependencies between the transportation of resources to their processing location and the logistical costs of transportation systems in promoting goods to markets.
2. Studying the dynamics of intergovernmental commercial cooperation in relation to the dynamics of the development of logistics systems and the transportation support of mutual supplies of a wide range of consumer goods.
3. Determination of the volume of international transportation between China and Russia by all types of transport over the last reporting period, some of which serve as a potential benchmark for the development of the transportation network between friendly countries in Asia and the Russian Federation.
4. Determination of the possibility of a comprehensive expert assessment of the pace of economic development of the countries participating in the corporate development of transportation systems.

The concept of innovations in transportation has been studied by the authors in previous scientific works [6] and is defined as an innovative vision or evaluative novelty based on the use of corporate formation of transnational logistics systems with new information and communication technologies for the documentation and tracking of goods using modern technical solutions that allow both to increase the efficiency of business processes and to improve the economic and time parameters of providing quality transportation services.

In addition, the authors substantiate the possibility of obtaining a multiplicative effect in the development of roadside infrastructure for both small towns and public-private partnerships as a result of the implementation of large-scale transport development projects in participating countries [7].

Studying foreign sources gives reason to believe that they consider the Asian-European transport support of goods deliveries through the formation of a large-tonnage maritime container transport complex, which actively affects transactional transportation costs. However, in recent times, increasing scientific attention has been focused on high-speed modes of transportation such as rail, road, and river transport, which include complex use of logistics advantages created by direct transportation corridors between Asia and Europe, involving several states included in the network to ensure the operation of newly created transport corporate systems.

The authors primarily consider transport logistics systems and innovations in the transport sector as a tool for increasing economic security [8-9-10], including in terms of efficiency in utilizing geographical and communicative opportunities, as well as corporate financing in forming transport systems [11].

The issues and prospects of developing corporate transport systems will expand opportunities for external and internal labor migration, which is currently one of the limiting factors for ensuring expanded reproduction in Russia due to a shortage of highly skilled personnel for high-tech production. These aspects are extensively studied by both domestic scientists [12], and foreign ones [13], usually from the perspective of replenishing the missing workforce in large cities and the corresponding demographic decline in the periphery.

It is no secret that the issue of the effectiveness of innovation implementation in the transportation sector as a factor in the efficient use of labor resources in Asian and Russian countries remains poorly researched, and there are no clear justifications or research in the direction of investment in human capital and labor productivity growth in the economy. At the same time, the opportunity for effective access to high-tech jobs located in industrial centers for labor resources residing in remote settlements eliminates the problem of the loss of working-age population on the periphery of Russia, since providing mobility for labor resources through the development of innovative transportation systems and transport corridors allows for the use of labor force without changing the place of residence, as it

increases the speed of movement of labor resources over a relatively long distance between their place of residence and place of work [13].

Therefore, the authors argue for the direct dependence of the growth of territorial labor productivity on the implementation of innovations specifically in the transportation sector.

**Material and methods**

The authors used various methods of analysis, statistical observation, as well as methods of abstraction, generalization, scientific assumption, and mathematical modeling as scientific tools for the study.

Data analysis sources for the indicators under study included the websites of Rosstat (rosstat.gov.ru), the State Report of China, and the Ministry of Transport of the Russian Federation (mintrans.gov.ru).

Analysis of the aforementioned statistical data shows that there is a mismatch between the territorial economic needs for labor resources and the production potential in certain regions of Russia, which is not observed in modern China. Moreover, the labor resources with the required qualifications are scattered geographically, which creates a discrepancy with the production factors and needs.

For example, the imbalance between production and resource potential that requires organizing internal labor migration between the subjects of the Russian Federation can be assessed using the graph shown in Fig. №1.

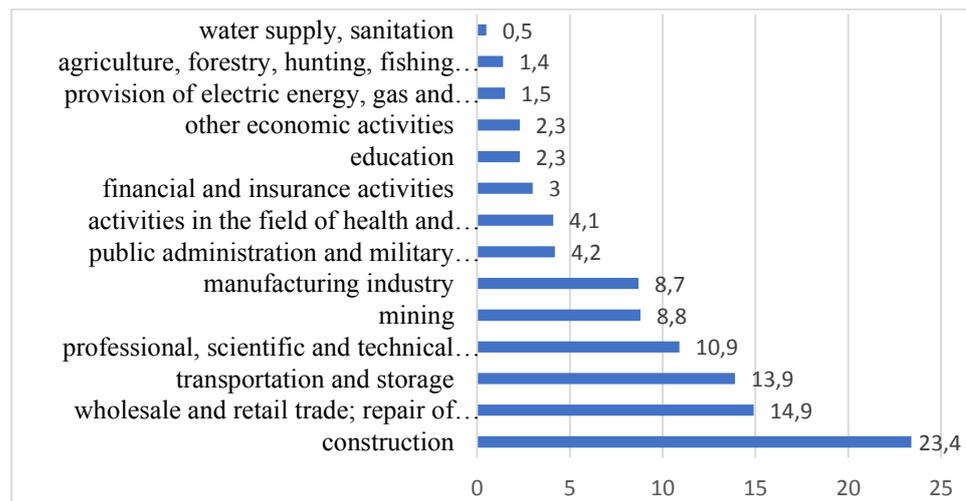


Fig. №1. Structure of internal labor migration by economic sectors (types of economic activities).

Meanwhile, the number and percentage of missing skilled labor, required to fill vacant positions among the total workforce as of December 31, 2022, is shown in Table 1.

Table 1

**List of Employees and Organizational Needs for Vacant Job Positions by Professional Groups as of December 31, 2022.**

Total by the surveyed types of activity			
	List number of employees - total, people	The need for employees to fill vacant jobs, people	The specific weight of the need for workers to fill vacant jobs in the total number of

			<i>jobs, in %</i>
Total specialists	26445178	1029853	3,5
Managers	22775337	49057	2,0
Specialists of the highest qualification level (in the field of science and technology, healthcare, education, administration, culture, sports, information and telecommunication technologies, etc.)	74056977	254088	3,1
Mid-level specialists (in the field of science and technology, healthcare, education, administration, culture, sports, information and telecommunication technologies, etc.)	3058066	119078	3,5
Employees engaged in the preparation and execution of documentation, accounting and maintenance	1256548	45185	3,3
Employees of the service and trade sector, protection of citizens and property	2439278	136671	5,5
Qualified workers of agriculture and forestry, fish farming and fishing	186015	9373	4,5
Skilled workers in industry, construction, transport and related occupations	3634299	179268	4,8
Including in the field of construction	740862	52979	6,4
in the field of metalworking and mechanical engineering	1630398	60331	3,5
in the field of electrical engineering and electronics	668342	32818	4,7
in the field of food, woodworking, textile and clothing industries and workers of related occupations	550131	31665	5,3
Operators of production plants and machines, assemblers and drivers	3423438	124359	3,6
Unskilled workers	2764635	112748	4,9

The analysis shows that the overall demand for personnel throughout the country is more than 1 million people, with an average proportion of job vacancies of over 3.8%. The highest demand for qualified workers is observed in the industrial sector (in particular, in the field of mechanical engineering and metalworking), construction, and transportation, which amounts to 179,000 people and determines the proportion of demand in the total number of job vacancies at around 5.0%.

The statistical data confirms the problems of imbalance in Russia concerning the territorial mismatch between production capacities and labor resources, which leads to underutilization of productive forces and capacities, having a tremendous impact on the slowdown of territorial development due to low labor productivity.

A strategic evaluation of the possibility of creating a new transport route "North-South" and a possible creation of a comprehensive Trans-Asian-Iranian-Caspian canal, including eastern and western branches, will significantly increase the competitiveness of transportation in the macroeconomic space. The western branch, through the Iranian-Azerbaijani vector, provides for the inclusion of a branch of transportation by road through the city of Resht. The vector of the eastern direction of the transportation system includes a canal route from China and India through Kazakhstan and Turkmenistan, with railway transportation included in the logistics complex providing water transportation from Russia to Iran. Such a logistics route, including the Iranian component of the route, involves the port of Bandar Abbas. In the current condition of the restructuring of the global order limiting the dominance of Euro-American relations, this route can become a crucial component of cargo transportation from Europe. This route is shorter when competing with cargo transportation from India and Latin America to the European part.

The Transport Development Strategy of the Russian Federation until 2030 includes measures aimed at increasing the dynamics of development of the unified transport system of the European part of the Russian Federation. Innovative organizational solutions and measures to increase labor productivity, which are the basis for the intensive development of transportation, implementation of which would lead to an increase in transport volumes in European basins by 2.2 times by 2030 compared to 2010, including transit goods via the "North-South" international transport corridor. However, the volume of freight transportation and the volume of their processing in logistics centers and water transport ports after 2010, as shown by the analysis, has a tendency to decrease. For example, its share in the total volume of transportation in 2022 was only 1.7%.

The Federal project "Internal Waterways" was developed and approved, and it was planned to increase the capacity of the inland waterways by 36.6 and 19 million tons, respectively, solely through the construction of the Volga and Don (Nizhny Novgorod and Bogayevsk) low-head hydropower plants. However, the construction of the hydropower plants has been postponed to the strategic perspective of transport routes development in accordance with the implementation of transnational projects carried out by China and Russia.

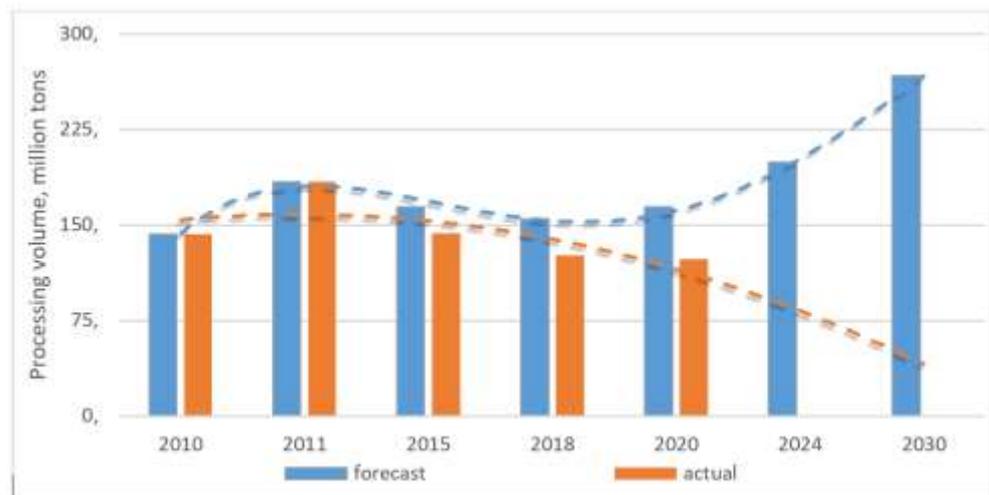


Fig 2. Forecast of the volume of transportation and processing in ports by inland water transport according to the basic strategy and its implementation.

Source: based on information from the statistical bulletin "Transport of Russia" and of all the strategic government documents in the field of transportation, the most important in relation to the international

project "North-South" is the "Strategy for the Development of Russian Seaports in the Caspian Basin, Railway and Road Approaches to Them for the Period up to 2030." Fig2. [14]

The document notes that cooperation between Russia and Asian countries, including India and China, in the Caspian-Black Sea territorial sector could be more effective and create the necessary conditions for increasing the throughput of freight flows through Russia.

Despite the development of trade between Russia, China, and Iran, the share of the "Asian tigers" in Russia's trade remains only about 3%. At the same time, Russia's raw material exports exceed imports from China and Iran by more than four times. The problem of China and India's participation in the transport corridor is that their main trading partners remain China, the United States, the UAE, and European countries. They account for about 40% of all external trade of India and China. Russia's share in the external trade of India and China, as well as India's share in Russia's external trade, remains at the level of 1-2%.

In order to increase trade turnover, in perspective, it is planned to deliver hydrocarbon raw materials, timber, and food resources including agricultural products from the grain and livestock farming of the South of Russia and the North Caucasus Federal District as return cargo to the ports of India, China, and Iran.

The implementation of the planned measures has become the basis for the development of Black Sea grain and oil loading terminals and the construction of new deep-water seaports, including a new port in the city of Kaspiysk by 2025. To achieve this, a complete overhaul of the supporting infrastructure, including railway and road access and storage facilities, is planned.

The financing of the construction of the ports of "Kavkaz" in Taman and the Kerch port complex enhances the role of developing a prospective trade corridor with Turkey, the Mediterranean, Latin American countries including African states with which Russia actively establishes trade relations today.

#### References

1. S.A. Vladimirov. On the main directions of development of the world transport system and logistics. "Transport on alternative fuel" No. 1 (49) / 2016, pp. 34 - 45.
2. Gavrilov A.I. Formation of an effective mechanism for managing the transport services in the region. N.Novgorod. Monograph: Publishing House "Dialogue of Cultures" - 2017. - 284p. A.I. Gavrilov. Regulation of the development of industrial business in Russia in the context of the deepening economic crisis. Management of economic systems. (VAK) -2016. №7
3. Gavrilov A.I. The mechanism of innovative management of the economy. — 2nd ed., corrected. and additional - Nizhny Novgorod: Publishing house of the Volga-Vyatka Academy of Public Administration, 2000. - 237 p.
4. Gavrilov A.I. Integral assessment of the level of economic security of the region. Monograph / - N. Novgorod, Publisher: "Dyatlovy Gory" N. Novgorod. 2017. 188s.
5. Glazyev S.Yu. Theory of long-term technical and economic development. - M., 1993.
6. Gavrilov A.I. Organizational foundations of integration processes in the modern economy (textbook). N. Novgorod: Publishing House of the Volga-Vyatka Academy of Public Administration, 2007. - 338p.;
7. Gavrilov A.I. Corporate governance: fundamentals of theory and organization. Nizhny Novgorod: Publishing House of Sarov City Printing House LLC, 2007.- 284p..
8. Gavrilov A.I. Methodical aspects of corporate management. N. Novgorod: VGIPU, 2009. - 269p.
9. N. Pumbasova, E. Upadysheva. The Factor of Innovation in the System of Assessing the Quality of Transport Services (2022) Lecture Notes in Networks and Systems, 403 LNNS, pp. 827-836.
10. Otorbay N., Akilova P.O. Analysis of the transport services market. Economic Bulletin, 3, 4, 2020, pp. 15 – 19.
11. Kushlin V.I. Russia and the New Economic Order of the 21st Century // The Economist. - 1997. - No 12.

12. M.A. Miroshnichenko, A.V. Kovtun, K.A. Kuznetsova. Quality management and human capital management based on lean innovation. *Natural-Humanitarian Studies* No. 26(4), 2019, pp. 142 - 147.
13. Klimenko V.E., Grechushkin D.O. Innovations in transport systems. In the collection: *Institutions and mechanisms of innovative development: world experience and Russian practice. collection of articles of the 12th International Scientific and Practical Conference. Kursk branch of the Financial University under the Government of the Russian Federation. Kursk, 2022, pp. 127-131.*
14. Strategy for the development of inland water transport of the Russian Federation for the period up to 2030.

#### Список литературы

1. С.А. Владимиров. Об основных направлениях развития мировой транспортной системы и логистики. «Транспорт на альтернативном топливе» № 1 (49) / 2016 г. С. 34 – 45.
2. Гаврилов А.И. Формирование эффективного механизма управления сферой транспортных услуг региона. Н.Новгород. Монография: Издательский дом «Диалог Культур» - 2017. - 284с. А.И.Гаврилов. Регулирование развития промышленного бизнеса России в условиях углубления экономического кризиса. Управление экономическими системами.(ВАК) –2016. №7
3. Гаврилов А.И. Механизм инновационного управления экономикой. — 2-е изд., испр. и доп. — Нижний Новгород: Издательство Волго-Вятской академии государственной службы, 2000. — 237 с.
4. Гаврилов А.И. Интегральная оценка уровня экономической безопасности региона. Монография/- Н. Новгород, Издательство:«Дятловы горы» Н. Новгород. 2017. 188с.
5. Глазьев С.Ю. Теория долгосрочного технико-экономического развития. – М., 1993.
6. Гаврилов А.И. Организационные основы интеграционных процессов в современной экономике (учебник). Н. Новгород: Изд-во Волго-Вятской академии государственной службы, 2007. – 338с.;
7. Гаврилов А.И. Корпоративное управление: основы теории и организации. Н. Новгород: Изд-во ООО «Саровская Городская Типография», 2007.- 284с..
8. Гаврилов А.И. Методические аспекты корпоративного менеджмента. Н. Новгород: ВГИПУ, 2009. – 269с.
9. N. Pumbrosova, E.Upadysheva. The Factor of Innovation in the System of Assessing the Quality of Transport Services (2022) *Lecture Notes in Networks and Systems*, 403 LNNS, pp. 827-836.
10. Оторбай Н., Акилова П.О. Анализ рынка транспортных услуг. *Экономический вестник*, 3, 4, 2020 г. С. 15 – 19.
11. Кушлин В.И. Россия и новый экономический порядок XXI века// *Экономист*. – 1997. – №12. 4.
12. М.А. Мирошниченко, А.В. Ковтун, К.А. Кузнецова. Менеджмент качества и управление человеческим капиталом на основе бережливых инноваций. *Естественно-гуманитарные исследования* №26(4), 2019, С. 142 – 147.
13. Клименко В.Е., Гречушкин Д.О. Инновации в транспортных системах. В сборнике: *Институты и механизмы инновационного развития: мировой опыт и российская практика. сборник статей 12-й Международной научно-практической конференции. Курский филиал Финансового университета при Правительстве РФ. Курск, 2022. С. 127-131.*
14. Стратегия развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации на период до 2030 год.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Гаврилов Александр Иванович**, доктор экономических наук, профессор кафедры Государственного управления и менеджмента Нижегородского института управления Российской академии государственной службы при Президенте РФ, академик РАЕН, Советник Минобрнауки РФ, Gai53@list.ru

**Alexander I. Gavrilov**, Doctor of Economics, Professor of the Department of Public Administration and Management of the Nizhny Novgorod Institute of Management of the Russian Academy of Public Administration under the President of the Russian Federation, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Counselor of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Gai53@list.ru

**Стрельцов Иван Иванович**, аспирант кафедры экономики и менеджмента Волжского государственного университета водного транспорта istreltsov@yandex.ru

**Ivan I. Streltsov**, postgraduate student of the Department of Economics and Management, Volga State University of Water Transport istreltsov@yandex.ru

**У Сяньюй**, соискатель кафедры экономики и менеджмента Волжского государственного университета водного транспорта. ytmikasa@yandex.ru

**Wu Xiangyu**, Competitor of the Department of Economics and Management, Volga State University of Water Transport. ytmikasa@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 23.04.2023; опубликована онлайн 20.06.2023.  
Received 23.04.2023; published online 20.06.2023.

УДК 658.7

DOI: 10.37890/jwt.vi754.354

## **Анализ и оценка эффективности инвестиций в развитие логистических систем**

**Ж.К. Кегенбеков<sup>1</sup>**

*ORCID: 0000-0001-8175-7440*

**А.А. Кожаметова<sup>1</sup>**

*ORCID: 0009-0000-3396-6774*

<sup>1</sup>*Казахстанско-Немецкий университет, г.Алматы, Казахстан*

**Аннотация.** В данной статье представлены ключевые вопросы анализа и оценки эффективности инвестиций в развитие логистических систем с правильным и целесообразным использованием бюджетных средств.

Во многом успех работоспособности предприятия связан с уровнями качества, организации и действенности движения материальных потоков, которое в свою очередь зависит от использования логистического метода в ходе управления процессами производства, снабжения и сбыта компании. При переходе к производственно-логистической системе одним из важных условий считается наличие у большинства казахстанских предприятий необходимых современных и обновленных фондов. При решении этой проблемы наилучшим средством является привлечение инвестиций при нехватке нужных собственных источников финансирования.

В статье показаны теоретические и практические методы оценки эффективности инвестиций в развитие логистических систем. Однако важно анализировать и оценивать эффективность инвестиций в логистические системы для обеспечения того, чтобы они приносили желаемые результаты. При оценке эффективности инвестиций в логистические системы важно учитывать цели инвестиций. Это может включать в себя снижение затрат, улучшение обслуживания клиентов или повышение эффективности. После того, как цели инвестиций были установлены, необходимо измерить успех инвестиций.

В целом, анализ и оценка эффективности инвестиций в развитие логистических систем в Казахстане имеет важное значение для обеспечения успеха экономического роста страны. Оценивая влияние инвестиций на ВВП страны, занятость и другие экономические показатели, а также на отдачу от инвестиций, можно определить эффективность инвестиций и обеспечить наиболее эффективное и действенное использование инвестиций.

**Ключевые слова:** логистические системы, инвестиции, экономика, капиталовложения, эффективность, модернизация, бюджет.

## **Analysis and evaluation of the investments effectiveness in the logistics systems development**

**Zhandos K. Kegenbekov<sup>1</sup>**

*ORCID: 0000-0001-8175-7440*

**Ayaulym A. Kozhakhmetova<sup>1</sup>**

*ORCID: 0009-0000-3396-6774*

<sup>1</sup>*Kazakh-German University, Almaty, Kazakhstan*

**Abstract:** This article presents the key issues of analysis and evaluation of the investments effectiveness in the logistics systems development with the correct and appropriate use of budgetary funds. In many ways, the success of the enterprise's performance is associated with the levels of quality, organization and efficiency of the movement of material flows, which in turn depends on the use of the logistic method in the course of managing the production, supply and marketing processes of the company. In the transition to the production and

logistics system, one of the important conditions is that the majority of Kazakhstani enterprises have the necessary modern and updated funds. In solving this problem, the best means is to attract investments in the absence of the necessary sources of financing. The article shows theoretical and practical methods for evaluating the effectiveness of investments in the development of logistics systems. However, it is important to analyze and evaluate the effectiveness of investments in logistics systems to ensure that they bring the desired results. When evaluating the effectiveness of investments in logistics systems, it is important to consider the objectives of the investment. This may include reducing costs, improving customer service, or improving efficiency. Once the investment objectives have been set, the success of the investment needs to be measured. In general, the analysis and evaluation of the effectiveness of investments in the development of logistics systems in Kazakhstan is essential to ensure the success of the country's economic growth. By evaluating the impact of investment on a country's GDP, employment and other economic indicators, as well as the return on investment, it is possible to determine the effectiveness of investments and ensure the most efficient and effective use of investments.

**Keywords:** logistics systems, investments, economics, investments, efficiency, modernization, budget.

### **Введение**

Логистические системы являются основой любого бизнеса и необходимы для эффективной доставки товаров и услуг. Инвестиции в развитие логистических систем могут принести бизнесу ряд преимуществ, включая улучшение обслуживания клиентов, снижение затрат и повышение эффективности.

Это может включать в себя анализ отзывов клиентов, изучение финансовых показателей бизнеса и измерение эффективности логистической системы. Также важно учитывать долгосрочные последствия инвестиций в логистические системы. Это включает в себя рассмотрение потенциала для будущих сбережений, потенциала для будущего роста и потенциала для повышения удовлетворенности клиентов. Глядя на долгосрочные последствия инвестиций, предприятия могут гарантировать, что их инвестиции приносят желаемые результаты в долгосрочной перспективе.

Наконец, важно учитывать устойчивость инвестиций в логистические системы. Это включает в себя рассмотрение потенциала для будущих инвестиций и потенциала для того, чтобы система оставалась эффективной и рентабельной с течением времени. Рассматривая устойчивость инвестиций в логистические системы, предприятия могут гарантировать, что их инвестиции приносят желаемые результаты в долгосрочной перспективе.

В последние годы наблюдается рост интереса к изучению эффективности инвестиций в развитие логистических систем в Казахстане. Это было обусловлено тем фактом, что страна переживает быстрый экономический рост и развитие, что приводит к увеличению спроса на эффективные логистические системы. Для того, чтобы оценить эффективность инвестиций в развитие логистических систем, исследователи разработали различные модели и методы. Эти модели и методы включают использование количественных и качественных данных, а также статистических и имитационных методов [1,2,3].

Данные модели и методы были использованы для анализа экономических и социальных последствий инвестиций в развитие логистических систем в Казахстане. Кроме того, исследователями также разработан ряд инновационных подходов к анализу и оценке эффективности инвестиций в развитие логистических систем в Казахстане. Эти подходы предполагают использование передовых технологий, таких как искусственный интеллект и машинное обучение.

Эти технологии позволили исследователям разработать более точные модели, которые способны лучше отражать сложные взаимосвязи между инвестициями и их воздействием на экономику и общество. В целом, изучение эффективности

инвестиций в развитие логистических систем в Казахстане в последние годы приобрело большую научную новизну. Это позволило исследователям разработать более точные модели и методы, которые способны лучше отражать сложные взаимосвязи между инвестициями и их воздействием на экономику и общество [6].

### **Основные положения**

Целью данной работы является рассмотрение теоретико-методических положений и разработка практических рекомендаций касательно полного анализа и оценки продуктивности капиталовложений в развитие логистических систем. Возможность влияния инвестиций на совершенствование логистических систем. И исходя из поставленных задач было включено определение путей модернизации и совершенствования области логистических систем с помощью стороннего капиталовложения. Также были рассмотрены недостатки и выявлены основные рекомендации касательно инвестиций в развитие логистических систем. В результате этого исследования нами будут определены пути модернизации и способы повышения эффективности производственно-логистических систем с использованием инвестиций в Казахстане [5].

Анализ и оценка эффективности инвестиций в развитие логистических систем в Казахстане требует практического подхода, учитывающего как краткосрочные, так и долгосрочные эффекты инвестиций. Комплексный подход к анализу и оценке эффективности инвестиций должен включать как количественные, так и качественные методы.

Количественные методы анализа и оценки эффективности инвестиций в развитие логистических систем в Казахстане включают анализ затрат и выгод, анализ экономической добавленной стоимости, анализ возврата инвестиций. Эти методы используются для оценки ожидаемой финансовой отдачи от инвестиций и сравнения ожидаемой доходности с фактической доходностью.

Качественные методы анализа и оценки эффективности инвестиций в развитие логистических систем в Казахстане включают анализ заинтересованных сторон, анализ рисков и анализ процессов. Анализ заинтересованных сторон используется для выявления заинтересованных сторон, участвующих в инвестициях, и оценки их интересов и проблем. Анализ рисков используется для оценки потенциальных рисков, связанных с инвестициями, и разработки стратегий смягчения этих рисков. Анализ процессов используется для оценки эффективности процессов, участвующих в инвестициях, и определения областей для улучшения.

Сочетая количественные и качественные методы, организации могут лучше оценивать потенциальную отдачу от своих инвестиций и принимать обоснованные решения о своих инвестициях [6,7].

Касаемо характеристики эффективности инвестиций в транспортно-логистическую систему необходимо разумное использование бюджетных средств на разных позициях и уровнях. Логистическая система производства - это система, дающая возможность транспортировать необходимое количество товаров, грузов или пассажиров в заранее назначенную точку по приемлемому маршруту следования за установленное время с наименьшими расходами. Расходы на производство любого продукта состоят из себестоимости товара и затрат на реализацию всех процессов начиная с приобретения сырья заканчивая покупкой продукта итоговым потребителем. Значительную долю издержек формируют вложения, связанные с транспортно-логистическими расходами во всех уровнях цепи поставок под названием «производитель товара – конечный потребитель товара». Процесс движения материальных потоков от исходного момента происхождения сырья до финального момента потребления готового продукта опять же нуждается в тратах, которые в свою очередь способны достигать до 50 % от всей суммы расходов на логистику.

Повышение эффективности движения материальных потоков в логистической системе в целом приводит к успеху благодаря постоянным капиталовложениям. Денежные потоки возможно трансформировать в совершенно другие ресурсы, такие как: продукт, то есть услуги или товар, а также труд, информация. Таким образом оптимальное движение потоков финансовых ресурсов является одним из главных пунктов продуктивной работы логистической системы производства [4].

### **Обзор литературы**

Методологией логистизации производственных процессов в последнее время занимаются многие отечественные и зарубежные исследователи. Среди них несомненный вклад в развитие логистики как науки и практического инструмента повышения эффективности производства внесли Ахметова З., Ергобек Д., Муса К., Ыдырыс С. и многие другие.

Вместе с тем вопросы повышения эффективности производственных процессов на основе применения логистического подхода требуют дальнейшей разработки. В настоящее время недостаточно проработаны вопросы методологии практического перехода от традиционного к логистически организованному производству. Дискуссионными остаются положения понятийно-терминологического аппарата, в частности классификации производственно-логистических систем и выделения их основных отличий от традиционно-организованных. Не проработан механизм определения критериев оценки эффективности логистизации производственных процессов, что, несомненно, препятствует увеличению количества промышленных предприятий, способных гибко и рационально управлять производством [8].

Отсутствие достаточного практического опыта в вопросах привлечения и управления инвестициями в казахстанской практике, сложность и неоднозначность существующих зарубежных и казахстанских методических рекомендаций по их оценке обусловили большое внимание к исследуемой области со стороны ученых и практиков. В трудах отечественных и зарубежных специалистов проработан ряд теоретических и методологических аспектов данной проблематики. Большой вклад в разработку различных аспектов проблем инвестирования, а также в развитие методологии и практического применения оценки инвестиций внесли такие казахстанские и западные ученые, как Раимбеков Ж.С. Баймбетова А.Б. и многие другие. Балгабеков Т.К. Абдураева Г.Е. Магавин С.Ш. Өтебаев И.С. Кошмаганбетова А.С.

Казахстан является быстро развивающейся страной, и его экономика сильно зависит от развития его логистических систем. В последние годы правительство Казахстана инвестировало значительные средства в развитие своей логистической инфраструктуры, включая строительство новых автомобильных и железных дорог, модернизацию существующих транспортных сетей и развитие новых портов и аэропортов.

Чтобы определить эффективность этих инвестиций, важно проанализировать влияние инвестиций на общую производительность логистической системы. Это включает в себя анализ экономической эффективности инвестиций, влияния на эффективность логистической системы и влияния на общие экономические показатели Казахстана.

Казахстанские специалисты провели ряд исследований для анализа эффективности инвестиций в развитие логистической системы, которые были сосредоточены на изучении влияния инвестиций на повышение эффективности логистической системы, влияния на экономическую эффективность инвестиций и влияния на общие экономические показатели Казахстана. Исследования также показали, что инвестиции оказали положительное влияние на качество жизни граждан Казахстана, а также на конкурентоспособность страны [9].

### **Материалы и методы**

В настоящей работе применялись следующие методы: представлены и взяты на рассмотрение теоретико-методические положения и разработаны практические рекомендации касательно анализа и оценки рентабельности инвестиций в усовершенствовании логистических систем на производстве. Описаны возможности прямого и косвенного влияния инвестиций на модернизацию логистических систем в разных ее аспектах.

Практические методы для улучшения эффективности инвестиций в развитие логистических систем в Казахстане на основе изученных материалов, источников, книг и интернет ресурсов таковы:

1. Использование передовых технологий: инвестиции в передовые технологии, такие как искусственный интеллект и автоматизация, могут помочь оптимизировать процессы, снизить затраты и повысить общую эффективность.
2. Инвестирование в инфраструктуру: Инвестиции в инфраструктуру, такую как автомобильные, железные дороги и порты, могут помочь сократить время и затраты, связанные с транспортировкой товаров.
3. Поощрение сотрудничества: Поощрение сотрудничества между поставщиками логистических услуг, государственными учреждениями и другими заинтересованными сторонами может помочь обеспечить эффективное и действенное использование ресурсов.
4. Инвестирование в обучение и образование: Инвестиции в обучение и образование для специалистов по логистике могут помочь гарантировать, что они обладают навыками и знаниями, необходимыми для эффективной работы.
5. Внедрение лучших практик: Внедрение лучших практик, таких как бережливое производство и 6 Sigma, может помочь сократить отходы и повысить эффективность.
6. Использование данных и аналитики: использование данных и аналитики может помочь определить области улучшения и возможности для экономии средств.
7. Развитие партнерских отношений между государственным и частным секторами: Развитие государственно-частного партнерства может помочь использовать ресурсы и опыт для повышения эффективности [5,6,7].

### **Результаты**

Несмотря на положительное экономическое развитие на рынке более чем за пятнадцатилетний промежуток времени, множество частных и государственных компаний, встретились лицом к лицу с достаточно невысокой эффективностью производства и сбыта своей продукции из-за нехватки слаженно организованной и гибкой логистической инфраструктуры. Также низкие показатели работоспособности казахстанских предприятий были связаны с наличием на то время высокобюджетных и изживших себя промышленных производств, оставшихся еще с советского периода.

По причине этого перед большинством предприятий стояла актуальная проблема с поиском путей улучшения общего показателя рентабельности бизнеса для реформирования и реконструкции организаций. Модернизация производства через организацию и переход логистических производственных систем благодаря вовлечению инвестиций является одним из важнейших мер на пути совершенствования компаний.

Согласно аналитическим данным сайта Finprom, общий инвестиционный объем в складскую и транспортную сферы за период с января по июль этого года соответствует 497,5 миллиардам тенге, образуя 8,1% от общего процента капиталовложения в базовый капитал по Республике Казахстан, отдавая первенство

только таким отраслям как недвижимые имущества и горнодобывающие промышленности.

Логистические услуги по причине экономического кризиса во время пандемии, потеряли свой высокий спрос, как в прежние времена. Прошлогодние показатели выше на 5% показателей текущего года.

В 2011 году объем капиталовложений был также низок, как за этот период, согласно *firpm.kz*. Финансирование в складскую и транспортную сферы за первый трехмесячный период этого года, второй сезон подряд сообщает о спаде: с января по апрель данные показывают сумму в 154,6 млрд тг. Что разумеется меньше на 23,5%, чем за соответствующий промежуток времени в прошлом году, который составлял 75,6%. За год до этого снижение в тот же четырехмесячный период было равно 33,5%. Также нужно отметить, спад был характерен для девяти регионах Казахстана из семнадцати.

Актюбинская область занимает лидирующую позицию по сравнению с другим регионами нашей страны в сфере финансирования в логистическую инфраструктуру. В этот регион инвестировали в 3,2 раза больше в отличие от прошлого года, сумма капиталовложения составила около 93,7 миллиарда тенге. Прямо после этой области занимают второе и третье место по инвестированию в транспортно-логистическую систему Карагандинская и Алматинская области, с показателями в 59,6 миллиарда тенге (+98,9%) и 50,5 миллиарда тенге (+18,8%).

Больше всего сокращения заметны в Кызылординской и Павлодарской (–69,1%) областях: –83,5% и –69,1%. Та же тенденция на снижение отмечена в столице, в городе Астана (–47,1%).

Более чем 40% инвестирования приходится на собственный бюджет предприятия от общего объема, то есть 200,1 миллиарда тенге, что на 5,8% меньше по сравнению с прошлым годом.

Также значительный процент финансирования составляют республиканский и местный бюджеты, а именно 110,2 миллиарда тенге (+3,6%) и 80,1 миллиарда тенге (+50,9%) согласно существующим данным. Следом идут кредитования банков (13,3 миллиарда тенге), однако их показатели значительно ниже чем в прошлом году – на 62,5% меньше. Затем идут остальные заемные суммы, то есть 93,9 миллиарда тенге (–16,8%), и из них 76 миллиардов тенге приходится на иностранный заем (+32,2%).

Инвестиционный рост республиканского капитала в складирование и в транспорте увеличился на 6,1% до 24 млрд тенге. Вложения в сфере благодаря местному бюджетированию снизились до 16,9 миллиардов тенге, на 4,4% меньше, чем в прошлом году. Больше всего сократились капиталовложения из-за банковских кредитов до 4,6 миллиардов тенге, что на 67,2% ниже. Общий объем инвестиционных вложений за заемные средства аналогично уменьшился до 27,6 млрд тг и на 21,9%. Интересно, что в тот же момент, в схожей области наблюдается увеличение денежных средств зарубежных инвесторов, примерно на на 21,9%, то есть до 23,1 млрд тг.

Именно поэтому при принятии инвестиционных решений по финансированию развития логистических систем самым важным является правильная оценка эффективности предполагаемых капиталовложений. В основе такой оценки лежат расчет и сравнение предполагаемых инвестиций и будущих доходов (денежных поступлений), а также сравнение эффективности инвестиций в различные логистические проекты. Кроме того, необходимо учитывать, что в качестве альтернативы вложений средств в создание или развитие логистической системы выступают финансовые вложения в другие направления деятельности предприятия, помещение финансовых средств в банк под проценты или обращение их в ценные бумаги. Из-за этого каждое инвестиционное решение нуждается в анализе рисков и угроз в целях их минимизации и эффективной реализации логистических проектов.

Поэтому вопросы разработки действенной модели анализа и оценки эффективности инвестиций в развитие производственно-логистических систем являются актуальными в современных казахстанских экономических условиях [3].

### **Заключение**

В данной работе был рассмотрен анализ развития логистических систем в Казахстане, который является ключевым фактором экономического роста страны. В последние годы правительство Казахстана вложило значительные средства в развитие логистических систем, чтобы способствовать эффективному перемещению товаров и услуг внутри страны. Анализ эффективности этих инвестиций необходим для того, чтобы определить, приносят ли инвестиции желаемые результаты. Для этого необходимо учитывать ряд факторов, в том числе уровень инвестиций, количество созданных рабочих мест, стоимость перевозок, качество предоставляемых услуг.

С точки зрения создания рабочих мест понятно, что развитие логистических систем в Казахстане создало значительное количество рабочих мест. Согласно отчету Всемирного банка, количество рабочих мест, созданных в логистическом секторе в Казахстане, увеличилось на 8,7% в период с 2009 по 2015 год. Это свидетельствует о том, что инвестиции в логистические системы оказались эффективными в создании рабочих мест. С точки зрения транспортных расходов, развитие логистических систем в Казахстане привело к снижению стоимости перевозок.

По данным Всемирного банка стоимость перевозок снизилась на 5,1% в период с 2009 по 2015 год. Это свидетельствует о том, что инвестиции в логистические системы оказались эффективными в снижении транспортных расходов. Наконец, с точки зрения качества предоставляемых услуг, развитие логистических систем в Казахстане привело к улучшению качества услуг. По данным Всемирного банка, качество услуг, предоставляемых логистическими компаниями в Казахстане, увеличилось на 6,3% в период с 2009 по 2015 год. Это свидетельствует о том, что инвестиции в логистические системы оказались эффективными в повышении качества услуг. В целом, инвестиции в развитие логистических систем в Казахстане оказались эффективными в создании рабочих мест, снижении транспортных расходов, повышении качества услуг. Это свидетельствует о том, что инвестиции были успешными в содействии экономическому росту в Казахстане [3].

В последние годы в Казахстане наблюдается быстрый экономический рост, и развитие логистических систем является важной частью этого роста. Инвестиции в логистические системы необходимы для обеспечения эффективной транспортировки товаров и услуг, а также для содействия росту бизнеса и экономики. Для оценки эффективности инвестиций в развитие логистических систем в Казахстане важно учитывать влияние инвестиций на экономику страны.

Развитие логистических систем может оказать положительное влияние на экономику за счет повышения эффективности перевозок и снижения стоимости товаров и услуг. Кроме того, развитие логистических систем может повысить конкурентоспособность бизнеса в стране, а также способствовать росту бизнеса и экономики. Для оценки эффективности инвестиций в развитие логистических систем в Казахстане важно проанализировать влияние инвестиций на экономические показатели страны.

Это можно сделать, оценив влияние инвестиций на ВВП страны, занятость и другие экономические показатели. Кроме того, важно проанализировать влияние инвестиций на эффективность перевозок, стоимость товаров и услуг, а также конкурентоспособность бизнеса в стране. Наконец, важно оценить эффективность инвестиций в развитие логистических систем в Казахстане с точки зрения окупаемости инвестиций. Это может быть сделано путем оценки стоимости инвестиций и выгод, которые были получены от них. Кроме того, важно учитывать

влияние инвестиций на экономические показатели страны, эффективность перевозок, стоимость товаров и услуг, а также конкурентоспособность предприятий в стране.

#### Список литературы

1. Грибов Евгений Михайлович. Транспортно-складская логистика регионального экономического комплекса : Дис. ... канд. экон. наук : 08.00.06 : Ростов н/Д, 1999 189 с. РГБ ОД, 61:00-8/1476-3
2. Статистический сборник Министерства национальной экономики Республики Казахстан. / Под общей ред. Айдапкелова Н.С. // «Экономика и статистика» – Нур-Султан: 2020. – № 4. – 141 с.
3. Е. Кекчебаев, Г. Жакупова, Р. Сулейменов. Экономика Казахстана 2021, цифры, анализ, прогнозы. – Алматы, Нур-Султан. – 2021. // <http://marketingcenter.kz/20/economy-kazakhstan.html> (обновлено 15 апреля 2021)
4. Lyapin, S., Rizaeva, Y., Kadasev, D., Sysoev, A. Methods to Analyze Traffic Demand Formation in Intelligent Transportation and Logistic Regional Network. - (2020) Transportation Research Procedia, 45, pp. 522-529.
5. Bavrín, A., Koop, V., Lukashovich, N., Simakova, Z., Temirgaliev, E. The analysis of digitalization impact on personnel functions in logistics. - (2021) E3S Web of Conferences, 258, статья № 02025
6. Гаджинский А.М. Практикум по логистике: учебное пособие / А.М.Гаджинский. – 6-е издание, переработанное и дополненное // Москва: Дашков и К, 2008. – 358 с.
7. Инвестиционный портал. / Под общей ред. Аманбаев И. – Костанай: 2021. // <http://investinkostanay.kz/ru/page/contacts>
8. Статья // Транспортно-логистические центры: Зарубежный опыт. – 2007. – 1 ноября. // [https://www.lobanov-logist.ru/library/all\\_articles/57650/](https://www.lobanov-logist.ru/library/all_articles/57650/)
9. Henaо-Hernández, I., Muñoz-Villamizar, A., Solano-Charris, E.L. Connectivity Through Digital Supply Chain Management: A Comprehensive Literature Review. - (2021) Studies in Computational Intelligence, 987, pp. 249-259.

#### References

1. Gribov Evgenii Mihailovich. Transportno-skladskaya logistika regionalnogo ekonomicheskogo kompleksa : Dis. ... kand. ekon. nauk : 08.00.06 : Rostov n/D, 1999 189 c. RGB OD, 61:00-8/1476-3
2. Statisticheskii sbornik Ministerstva nasionalnoi ekonomiki Respubliki Kazahstan. / Pod obei red. Aidapkelova N.S. // «Ekonomika i tstatistika» – Nur-Sultan: 2020. – № 4. – 141 s.
3. E. Kekchebaev, G. Jakupova, R. Suleimenov. Ekonomika Kazahstana 2021, sifry, analiz, prognozy. – Almaty, Nur-Sultan. – 2021. // <http://marketingcenter.kz/20/economy-kazakhstan.html> (obnovleno 15 aprelya 2021)
4. Lyapin, S., Rizaeva, Y., Kadasev, D., Sysoev, A. Methods to Analyze Traffic Demand Formation in Intelligent Transportation and Logistic Regional Network. - (2020) Transportation Research Procedia, 45, pp. 522-529.
5. Bavrín, A., Koop, V., Lukashovich, N., Simakova, Z., Temirgaliev, E. The analysis of digitalization impact on personnel functions in logistics. - (2021) E3S Web of Conferences, 258, статья № 02025
6. Gadjinskii A.M. Praktikum po logistike: uchebnoe posobie / A.M.Gadjinskii. – 6-e izdanie, pererabotannoe i dopolnennoe // Moskva: Daşkov i K, 2008. – 358 s.
7. Investitsionnyi portal. / Pod obei red. Amanbaev I. – Kostanai: 2021. // <http://investinkostanay.kz/ru/page/contacts>
8. Statya // Transportno-logisticheskie sentry: Zarubejniy opyt. – 2007. – 1 noyabrya. // [https://www.lobanov-logist.ru/library/all\\_articles/57650/](https://www.lobanov-logist.ru/library/all_articles/57650/)
9. Henaо-Hernández, I., Muñoz-Villamizar, A., Solano-Charris, E.L. Connectivity Through Digital Supply Chain Management: A Comprehensive Literature Review. - (2021) Studies in Computational Intelligence, 987, pp. 249-259.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Жандос Кадырханович Кегенбеков**, к.т.н.,  
доцент, департамента факультета  
инжиниринга и информационных технологий,  
Казахстанско-Немецкий университет, ул.  
Пушкина 111, Алматы 050010, E-mail:  
kegenbekov@dku.kz

**Zhandos K. Kegenbekov**, Candidate of  
Technical Sciences, Associate Professor, Faculty  
of Engineering and Information Technology,  
Kazakh-German University, st. Pushkin 111,  
Almaty 050010, E-mail: kegenbekov@dku.kz

**Аяулым Азаматовна Кожакметова**,  
магистрант, факультета инжиниринга и  
информационных технологий, Казахстанско-  
Немецкий университет, ул. Пушкина 111,  
Алматы 050010, E-mail:  
kozhahmetova.ayaulym@mail.ru

**Ayaulym A. Kozhakhmetova**, undergraduate,  
Faculty of Engineering and Information  
Technology, Kazakh-German University, st.  
Pushkin, 111, Almaty 050010, E-mail:  
kozhahmetova.ayaulym@mail.ru

Статья поступила в редакцию 06.03.2023; опубликована онлайн 20.06.2023.  
Received 06.03.2023; published online 20.06.2023.

УДК 656.6

DOI: 10.37890/jwt.vi75.376

## **Актуальные задачи научных исследований в области управления развитием транспортного комплекса**

**Д.Н. Сухарев**

*АО «Русатом Оверсиз», г. Москва, Россия*

**Аннотация.** В статье выполнен сравнительный анализ проведенных в последние годы научных исследований в области управления развитием транспортного комплекса в России. Проведена группировка научных работ разных авторов по направлениям, а также даны предложения по дальнейшему развитию научных исследований. На основе выполненного исследования осуществлена попытка выстроить структуру проведенных учеными исследований в единую систему для формирования глобальной концепции управления развитием внутреннего водного транспорта РФ. Отмечено, что наибольший интерес для ученых на речном транспорте представляют направления оптимизации издержек и повышения эффективности, совершенствования механизмов государственного регулирования и государственно-частного партнерства, комплексного развития транспортной отрасли и формирования опорной сети комбинированных грузовых терминалов. Указаны наименее проработанные на текущий момент вопросы, а именно: совершенствование нормативно-правового обеспечения и регламентации деятельности портов, тарифной политики и налогообложения с целью развития воднотранспортных узлов, использование государственно-частного партнерства, управление устойчивым развитием транспортной отрасли в целом и предприятий в частности, выстраивание на предприятиях внутреннего водного транспорта эффективной системы внутреннего контроля.

**Ключевые слова:** транспортный комплекс, водный транспорт, государственное регулирование, государственно-частное партнерство.

## **Current tasks of scientific research in the field of transport complex development management**

**Dmitry N. Sukharev**

*Rusatom Overseas JSC, Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** The article made a comparative analysis of scientific research carried out in recent years in the field of management of the development of the transport complex in Russia. A grouping of scientific works by different authors in the areas was carried out, as well as proposals for the further development of scientific research were given. Based on the completed research, an attempt was made to build the structure of the research carried out by scientists into a single system to form a global concept for managing the development of inland water transport of the Russian Federation. It was noted that the greatest interest for scientists in river transport is the areas of cost optimization and efficiency improvement, improvement of state regulation mechanisms and public-private partnership, integrated development of the transport industry and the formation of a support network of combined cargo terminals. The least developed issues are indicated at the moment, namely: improvement of regulatory support and regulation of port activities, tariff policy and taxation for the development of water transport hubs, the use of public-private partnership, management of sustainable development of the transport industry in general and enterprises in particular, building an effective internal control system at inland water transport enterprises.

**Keywords:** transport complex, water transport, state regulation, public-private partnership.

## **Введение**

В условиях длительного морального и физического износа инфраструктуры и подвижного состава речного транспорта, несоответствия производственных мощностей судоходных компаний, портов и других организаций внутреннего водного транспорта новым реалиям функционирования и геополитической обстановке, актуальным становится вопрос совершенствования управления развитием транспортного комплекса.

В связи с этим представляет интерес проведение анализа выполненных в данной области исследований, современного состояния научного и методического обеспечения применительно к области государственного регулирования на водном транспорте, а также выявление неохваченных или недостаточно проработанных исследователями сфер и перспективных направлений развития государственного регулирования в отношении портовой инфраструктуры и развития транспортных узлов на базе речных портов.

## **Методы**

Для проведения анализа и формирования общего представления о выполненных исследованиях, рассматриваемых в них вопросах и проблемах, а также формулировки направлений дальнейших исследований, автором был применен следующий подход.

Вначале были отобраны научные публикации в периодических изданиях и материалах конференций, диссертационные исследования, выполненные по рассматриваемой тематике. Далее был проведен первичный анализ объектов и предметов исследований с целью выбора среди них наиболее интересных, актуальных и имеющих непосредственное отношение к области управления развитием транспортного комплекса, а также предлагающих решения и научно-методические рекомендации применительно к деятельности водного транспорта и его инфраструктурных объектов. Затем данная выборка подверглась более детальному изучению и анализу, выявлению ключевых особенностей работ, их положительных сторон, недостатков и требующих дальнейшей проработки моментов (в качестве примера в результатах настоящего исследования приведены представляющие наибольший интерес работы и их авторы, а также дана краткая характеристика самих исследований).

На заключительном этапе анализа осуществляется группировка выполненных исследований, систематизация основных рассматриваемых ими вопросов, а также указываются задачи и недоработки, требующие своего уточнения и развития при проведении последующих исследований этими же или другими учеными.

## **Результаты**

Часть исследований, посвященных проблематике управления развитием транспортного комплекса и государственного регулирования в области функционирования воднотранспортной инфраструктуры, сосредоточена на оптимизации издержек и повышении эффективности на внутреннем водном транспорте.

Так, исследования Ботнарюк М.В. [1-2] посвящены оптимизации транзакционных издержек, возникающих между портом и его бизнес-партнерами, оценке конкурентоспособности морских транспортных узлов (одним из центральных элементов которых являются порты), факторам, тенденциям развития и подходам к её повышению. Одной из ключевых идей работ является развитие партнерских взаимоотношений участников транспортного узла, а также их организационное, информационное и методическое обеспечение. Представляет интерес предложение по формированию интегрированной структуры на базе нескольких морских портов для снижения транзакционных издержек. При этом функционирование данного института

автор считает невозможным без поддержки со стороны государства. Производимая в работах оценка эффективности (определение эффекта синергии) учитывает лишь коммерческую эффективность портов, входящих в интегрированную структуру. По нашему мнению, необходимо дополнительно определить эффективность для других участников транспортного процесса, грузовладельцев, государственных органов, общественную полезность.

Кудрявцева И.Ю. [3-4] на основе анализа и обобщения методик оценки эффективности системы внутреннего контроля (СВК) разработала методику оценки предприятий речного транспорта в разрезе компонентов СВК. В ходе исследования для оценки данных компонентов СВК была разработана модель их оценки, а также оценки эффективности СВК в целом, которая предполагает использование качественных и количественных показателей, на основе которых рассчитывается интегральный показатель оценки эффективности СВК, в том числе в разрезе каждого компонента. Также автором разработана модель системы внутреннего контроля на предприятиях речного транспорта, учитывающая внешние и внутренние факторы. Затронутая тематика имеет перспективы дальнейшей разработки, поскольку на предприятиях речного транспорта СВК она не получила широкого распространения. При этом в исследовании были использованы устаревшие нормативные документы в части требований к организации СВК, а риск-ориентированный подход в применении СВК рассматривается только со стороны рисков-потерь, без рисков-возможностей. Также, по нашему мнению, отнесение автором службы внутреннего контроля к части СВК является дискуссионным, поскольку в практике работы таких подразделений закладывается главной задачей независимая оценка состояния СВК организации и запрет на подмену функции менеджмента по выстраиванию СВК.

Коршунов Д.А. показал тяжелое состояние внутреннего водного по сравнению с другими видами транспорта, а в особенности – речных портов [5]. Сформулированные в исследовании предложения касаются совершенствования организационной системы управления речного порта и оценке коммерческой эффективности данных изменений, причем совершенствование управления работой речных портов рассматривается только с позиций самих предприятий, без учета интересов или роли государства в этом процессе.

Троценко Р.В. рассматривает повышение эффективности речного транспорта посредством интеграции его предприятий в рамках единой структуры и взаимодействия с другими видами транспорта [6]. В качестве формы объединения предприятий предлагается создание корпорации, что может оказаться невозможным без поддержки со стороны государства и в условиях антимонопольного законодательства.

Работа [7] посвящена развитию смешанных перевозок различными видами транспорта с повышением роли внутреннего водного транспорта. Рассмотрены конкурентные преимущества транспортных систем, сделаны предложения по концептуальному и программно-целевому управлению развитием комбинированных перевозок, обоснована эффективность смешанных река-море перевозок. В работе большинство подходов и оценка эффективности произведены с точки зрения организаций транспорта (преимущественно, речь идет не о терминалах, а о перевозчиках) без учета какого-либо участия государства в развитии комбинированных перевозок. Исключение составляет предложенная схема программно-целевого управления развитием комбинированной системы перевозок, в которой показано взаимодействие различных федеральных и региональных структур с предприятиями транспорта (транспортным кластером). Однако в статье данная схема не получила должного развития (например, введена межрегиональная комиссия по транспорту, а её функции, задачи, структура, полномочия не показаны).

Сустретов С.В. и Ничипорук А.О. в своей научной статье [8] представили результаты анализа современного состояния грузовых перевозок в судах

инновационного типа (на воздушной подушке, на подводных крыльях, грузовые, пассажирские и грузопассажирские). Обобщен зарубежный и отечественный опыт в области проектирования и эксплуатации рассматриваемых типов судов, приведены наиболее интересные примеры и разработки. Проанализирован ряд публикаций в рассматриваемой области, обозначены наиболее интересные и перспективные предложения и рекомендации различных ученых и авторов. На основании выполненного обзора опыта, а также анализа научных публикаций сделаны выводы и предложения о наиболее перспективных направлениях дальнейших исследований по совершенствованию организационно-технических аспектов грузовых перевозок с использованием скоростных судов и судов инновационного типа. Проведенное исследование имеет перспективы дальнейшей проработки, но требует дополнительных исследований в части обоснования эффективности эксплуатации предлагаемых судов инновационного типа на линиях с разными пассажиро- и грузопотоками, поскольку одна из гипотез о возможности таких перевозок только при условии выделения субсидий от государства не подтверждена расчетами и может быть опровергнута.

Домниной О.Л. проведен анализ сложившейся ситуации с перевозкой грузов до и после введения санкций, связанных с изменившейся геополитической обстановкой в мире [9]. На основе информации из открытых источников обобщаются последствия введения санкций и указываются «основные болевые точки», показаны основные направления работы по снижению последствий от их введения. Данное исследование может использоваться как источник для получения статистических данных о текущем состоянии различных видов транспорта, однако требует уточнения и более углубленного изучения, поскольку построено на открытых источниках и может обладать большой долей погрешности.

Другая группа исследователей акцентирует внимание на вопросах государственно-частного партнерства в сфере управления развитием транспортного комплекса и инфраструктуры внутреннего водного транспорта в частности.

Например, Давыденко А.А. в своем исследовании [10] сосредоточился на классификации морских портовых комплексов, выявлении приоритетных направлений их развития. Среди недостатков государственного регулирования деятельности морских портов им названы: отсутствие эффективного государственно-частного партнерства (ГЧП), отсутствие должных налоговых и таможенных преференций, необходимость создания особых экономических зон на базе портов. Сформированное в данной работе понятие регионального морского порта требовало уточнения.

Соответственно, в работе Фофановой А.Ю. [11] уточнено понятие регионального морского портового комплекса, ранее сформулированного Давыденко А.А., указана потенциальная возможность формирования на их основе объединения портов кластерного типа. Также подчеркивается особое значение государственного влияния на порты как субъекты естественной монополии. Предложения Фофановой А.Ю. о необходимости определения коммерческой и бюджетной эффективности следует считать верными. Однако к социальной эффективности автор относит лишь снижение затрат клиентов портов, что требует своего дальнейшего развития.

Болдоровым А.Н. уточнены понятия «инвестиции», «инвестиционная деятельность», «государственно-частное партнерство» [12]. Рассмотрены недостатки такой формы ГЧП, как аренда. Совокупная эффективность ГЧП для государства складывается из бюджетной (налоги) и эффективности участия (коммерческой для госпредприятий), при этом в работе не учитываются социальный и экологический эффекты, которые в случае участия государства в проектах имеют немаловажное значение и также должны быть исследованы.

Ряд ученых рассматривает вопросы, связанные непосредственно с государственным управлением и регулированием деятельности транспортной отрасли и её отдельных инфраструктурных объектов.

Интерес представляет работа Скрынника А.М., поскольку рассматривает вопросы совершенствования и развития государственного регулирования на морском и речном транспорте [13]. Кроме предложений по развитию ГЧП в форме концессий Скрынник А.М. предлагает создать на речном транспорте ФГУП «Росречпорт» (аналог ФГУП «Росморпорт»). На уровне портов (речных и морских) предлагается введение соответствующих администраций с целью усиления функции контроля и взаимодействия с государственными органами. Для оптимизации работы речного транспорта в исследовании Скрынника А.М. предлагается ввести на региональном уровне единую транспортную структуру (универсальный региональный логистический центр, ориентированный преимущественно только на речной транспорт), а эффективность совершенствования управления водным транспортом оценивать с учетом транспортного и внетранспортного (социального, экологического) эффектов. Следует отметить, что в данной работе государственное регулирование рассматривается лишь как одно из направлений развития портовой деятельности, в результате чего сделанные предложения являются недостаточно проработанными и требуют своей дальнейшей конкретизации и обоснования.

Холопов К.В. провел оценку международного аспекта «Транспортной стратегии РФ до 2030 года с прогнозом до 2035 года» и указал на необходимость внесения в этот программный документ изменений на стадии его реализации [14]. Приведено 5 первоочередных мер, необходимых для стабилизации транспортной системы России международного значения в условиях кардинального изменения геополитической и геоэкономической обстановки в мире. Предложено переориентировать транспортную сеть России с транзитной схемы, направленной на встраивание в международную глобальную транспортную сеть, на формирование внутренней самодостаточной сети логистических цепочек, направленную на национальные интересы страны. Проведенное исследование перспективно, однако содержит в себе только концептуальные верхнеуровневые идеи развития транспортной инфраструктуры страны и требует дальнейшего более глубокого анализа и исследования.

В работе Малова В.Ю. и Мелентьева Б.В. [15] представлены результаты анализа необходимости активизации участия государства в управлении экономикой страны. Особое значение придается народнохозяйственному подходу к управлению процессом создания инфраструктурных объектов, в первую очередь транспортных. На примере проекта создания Северо-Сибирской магистрали обосновывается полезность использования межотраслевого инструментария с выделением пространственных характеристик изучаемого объекта. Опираясь на экономико-математическую модель, созданную при СССР (межотраслевой баланс с пространственными характеристиками), используемую как инструмент прогнозирования отраслевых и региональных пропорций, авторами предлагается своя модель ПРОМИН (пространственный межотраслевой инструментарий), как верхнеуровневый инструмент прогнозирования в транспортной отрасли. Проведенное научное исследование перспективно, однако также затрагивает только верхний (стратегический) уровень управления отраслью и может быть развито через встраивание в общую модель управления с предлагаемыми другими учеными моделями управления на межрегиональном, региональном и мезоуровнях. Несмотря на то, что авторами рассматривается в своем исследовании проект на железнодорожном транспорте, сам подход может быть применен и к водному транспорту.

Отметим еще одно направление исследований, связанное с выстраиванием опорной сети комбинированных грузовых терминалов на водном транспорте.

В статье Коршунова Д.А. [5] приводятся результаты исследования по перспективам формирования единого инфраструктурного комплекса внутреннего водного транспорта. В статье предложены актуальные для отечественной воднотранспортной системы направления научных разработок в рамках общей тематики исследования, в том числе моделирование типовых (стандартизированных) мультимодальных речных терминалов, формирование цифровых платформ для организации грузоперевозок в контейнерах по речным маршрутам страны. Затронутые в исследовании проблемы внутреннего водного транспорта России требуют дальнейшей комплексной и системной проработки при формировании и реализации предложенных проектов встраивания в международные транспортные пути, такие как «Северный морской путь», поскольку в самой работе анализируются аспекты функционирования внутреннего водного транспорта, а не транспортного комплекса страны в целом.

Синицын М.Г., Глоденис Т.В. и Масленников С.Н. в своей совместной работе [16] рассмотрели вопросы разработки методических основ при исследовании возможности вовлечения вновь осваиваемых участков в единую транспортную сеть страны. Синергетический подход использования методов и алгоритмов нелинейной динамики позволяет изучать функционирование транспортных систем в условиях возможных рисков и потерь, находить бифуркационные значения, определяющие структурную неустойчивость динамических транспортных систем. Авторами определены районы тяготения нефтегазоконденсатных месторождений, за которыми были закреплены базовые порты обслуживания, входящие в систему международного транспортного коридора «Северный морской путь». Рассмотрена транспортная инфраструктура каждого базового порта и выявлено, что при их обслуживании важную роль здесь имеет водный транспорт, без участия которого функционирование рассматриваемых районов тяготения будет затруднительно или практически невозможно. Предложены три схемы завоза грузов в базовые пункты месторождения. На заключительном этапе обслуживания выявлена значимость внутреннего водного транспорта при освоении континентального шельфа РФ, а также рассмотрены перспективы его использования на основе изученных авторами стратегии развития внутреннего водного транспорта и стратегия развития рассматриваемых регионов, входящих в районы тяготения. Проведенное исследование затрагивает вопрос встраивания внутреннего водного транспорта в структуру опорных портов крупной транспортно-логистической агломерации на примере «СевМорПути». Данное исследование перспективно, и может получить дальнейшее развитие в сторону углубленного анализа с точки зрения построения аналогичных опорно-транспортных сетей, но не на базе морских портов, а речных.

В совместном исследовании Курбатовой А.В. и Курбатовой Е.С. [17] рассматриваются первоочередные проблемы, связанные с совершенствованием планирования работы, использования производственных мощностей и развития речного транспорта, а также возможные пути их решения на основе развития интеграционных процессов и улучшения государственного контроля и регулирования на транспорте. Поднимается также аспект организационно-экономического взаимодействия портов и флота, а также портов и других видов транспорта, нуждающийся в совершенствовании наряду с материально-технической базой. Предлагается создание межрегиональных координационных транспортно-логистических центров (КТЛЦ) на базе воднотранспортных узлов. В исследовании нынешнего состояния внутреннего водного транспорта авторы приходят к выводу, что разобщенность участников данной части национальной экономики не привела к появлению крупного и сильного игрока, способного конкурировать с железнодорожным и автомобильным транспортом, и для возможности конкурировать с последними предлагается создать новую управленческую структуру – Федеральную администрацию речного транспорта (ФАРТ), для координации на федеральном

уровне деятельности всех участников данного рынка и получения синергетического эффекта. Проведенное научное исследование имеет большой потенциал дальнейшего развития, поскольку в нем были озвучены только верхнеуровневые аспекты проблематики существующего состояния внутреннего водного транспорта России, и требует более углубленного анализа, в том числе в части вопросов, посвященных функционированию предлагаемых органов управления, например способов планирования и координации КТЛЦ и ФАРТ деятельности всех предприятий на речном транспорте, а также его взаимодействия с другими видами транспорта, с целью гармоничного встраивания в мировые транспортные потоки.

В развитие идеи создания КТЛЦ или как альтернативу ему Прокофьевой Т.А. рассмотрены вопросы необходимости формирования мультимодальных транспортно-логистических центров на международных транспортных коридорах как новых инновационных механизмов совершенствования управления эффективностью транспортных магистралей [18]. Автор вводит понятие регионального транспортно-логистического центра (РТЛЦ) как центра притяжения товарных и сопутствующих (новые технологии, инвестиции и инновации, сервисы) потоков, предлагая использовать их для формирования региональных транспортно-логистических систем (РТЛС). Данное исследование применено к железнодорожному транспорту, однако может быть использовано и на речном транспорте, кроме того имеет большие перспективы для дальнейшей проработки с целью встраивания в государственную структуру управления транспортной отраслью страны.

Все вышеперечисленные исследования в той или иной степени посвящены развитию транспортной системы страны, однако не затрагивают аспект управления процессом развития, который, по нашему мнению, несет в себе одну из ключевых ролей в построении новой эффективной системы внутреннего водного транспорта России. Исследования в данном направлении представлены в четвертой группе, посвященной управлению устойчивым развитием.

В статье Бафанова А.П. [19] представлен авторский подход к решению актуальной научно-практической задачи по разработке методики обоснования экономической устойчивости оператора пассажирских перевозок, работающего в комбинированной системе на основе взаимодействия со смежными видами транспорта при организации эффективного маршрута. Представлены результаты анализа основных показателей деятельности пассажирского транспорта на внутренних водных путях. Отмечается тенденция увеличения спроса на комбинированные маршруты пассажирских перевозок в региональном и межрегиональном сообщениях. Проанализированы научные исследования по рассматриваемому вопросу и существующие методы определения уровня экономической устойчивости транспортных компаний. На основе авторского анализа разработан подход к обоснованию экономической устойчивости операторов комбинированных пассажирских перевозок в виде дерева свойств модели оценки и ключевых индикаторов и коэффициентов с учетом особенностей работы внутреннего водного транспорта. Автор исследования сконцентрировался только на пассажирских перевозках речным транспортом и не уделил внимания другим видам транспорта, что не позволило в полной мере раскрыть тему комбинированных перевозок. Также дальнейшим направлением исследования в данном вопросе будет являться проработка способов вычисления индикаторов экономической устойчивости операторов комбинированных пассажирских перевозок.

На основании проведенного анализа и обзора научных работ, авторефератов диссертаций и других источников применительно к сфере государственного регулирования на транспорте, особенно в области развития портовой инфраструктуры и транспортных узлов на базе речных портов, можно выделить несколько групп исследований, схематично представленных на рис. 1.



Рис.1. Основные направления исследования и рассматриваемых вопросов в области управления развитием транспортного комплекса (применительно к речному транспорту)

Как видно из представленного анализа отдельных источников, а также схематичного представления рассматриваемых в них вопросах, к основным направлениям исследований в области управления развитием транспортного комплекса применительно к речному транспорту следует отнести: оптимизацию издержек и повышение эффективности на речном транспорте; развитие государственной поддержки транспортной инфраструктуры на речном транспорте в форме государственно-частного партнерства и аналогичных механизмов взаимодействия государства с частным сектором; государственное регулирование деятельности речного транспорта, его экономические, организационные и

нормативно-правовые аспекты; формирование опорной сети комбинированных грузовых терминалов с участием водного транспорта.

### **Обсуждение**

Проведённый анализ содержит в себе набор научных вопросов, требующих углубленного научного исследования. Представленные результаты анализа применительно к сфере научно-исследовательского обеспечения управления развитием транспортного комплекса позволяют определить наиболее изученные и проработанные области, а также сформулировать потенциальные и перспективные направления для проведения последующих исследований.

По мнению автора, такими перспективными направлениями являются:

- совершенствование нормативно-правового обеспечения и регламентации деятельности портов;
- совершенствование тарифной политики и налогообложения с целью развития деятельности воднотранспортных узлов;
- использование ГЧП (в том числе в форме концессий) для развития портовой инфраструктуры;
- обоснование создания и эффективности деятельности дополнительных надзорных, контролирующих и поддерживающих органов (администраций портов, региональных комиссий и т.п.), проработка системы их работы и взаимодействия с другими государственными структурами;
- управление устойчивым развитием транспортной отрасли в целом и предприятий в частности;
- выстраивание на предприятиях внутреннего водного транспорта эффективной системы внутренних контролей, позволяющей не только отслеживать актуальное состояние процессов, но и предотвращать возникновение возможных рисков и потерь.

Таким образом, существует необходимость в проведении комплексного исследования по совершенствованию организационно-экономических форм и методов государственного управления устойчивым развитием инфраструктуры водного транспорта в соответствии со сформированным перечнем.

При этом необходимо учитывать следующие особенности, не принятые во внимание в ранее выполненных работах:

- оценка эффективности предложений и рекомендаций не должна ограничиваться определением только коммерческой составляющей. Необходима разработка методики, позволяющей оценить дополнительно социальную, а также внеотраслевую (внетранспортную) эффективность;
- при выработке рекомендаций, разработке методических положений необходимо руководствоваться интересами не только портов, но также и других организаций, участвующих или зависящих от результатов транспортного процесса (перевозчики, экспедиторы, грузовладельцы, государственные органы);
- рекомендации по развитию ГЧП на речном транспорте должны учитывать опыт других видов транспорта (в особенности морского), а также особенности сложившейся системы управления и функционирования отрасли.

Подобное исследование позволит выработать единый, всесторонний методический подход к формированию адекватной, отвечающей современным условиям, взвешенной государственной политики в области регулирования деятельности речных портов, а также выработке мер и механизмов поддержки, развития и повышения эффективности воднотранспортных узлов.

### **Заключение**

Проведенное исследование и обзор научных работ и публикаций в области управления развитием транспортного комплекса, его воднотранспортной инфраструктуры позволяют определить имеющийся научный задел и наиболее проработанные вопросы в данной сфере. Нами также были сформулированы направления для дальнейшей научной работы и исследований, нашедшие наименьшее отражение и освещение в уже имеющихся источниках. Это позволит более углубленно и обоснованно изучить данные аспекты, выработать предложения по совершенствованию обозначенных, наиболее актуальных задач и проблем применительно к управлению развитием транспортной отрасли в целом и инфраструктуры внутреннего водного транспорта в частности.

### **Список литературы**

1. Ботнарюк М.В., Классовская М.И. Определение значимости индикаторов достижения целей при построении системы управления предприятий транспортной отрасли в цифровой экономике // Морские интеллектуальные технологии. 2021. №2-4(52). С. 146–152.
2. Ботнарюк М.В., Кондратьев С.И. К вопросу о новых направлениях развития портовой инфраструктуры // Вестник ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова. 2016. №1(14). С. 47–49.
3. Кудрявцева И.Ю. Место внутреннего контроля в системе управления предприятиями водного транспорта // Мировые научные исследования современности: возможности и перспективы развития. Материалы XVI международной научно-практической конференции. Часть 1. Ставрополь, 2022. С. 649-652.
4. Кудрявцева И.Ю. Проблемы организации внутреннего контроля на предприятиях водного транспорта // Труды конгресса «Великие реки». Н. Новгород, 2020. URL: [http://vf-река-море.рф/2020/PDF/13\\_6.pdf](http://vf-река-море.рф/2020/PDF/13_6.pdf) (дата обращения: 8.05.2023)
5. Коршунов Д.А. Формирование инфраструктуры комплекса внутреннего водного транспорта // Научные проблемы водного транспорта. 2022. №72(3). С. 111–120. DOI:10.37890/jwt.vi72.289
6. Троценко Р.В. Проблемы модернизации инфраструктуры речного транспорта России. Монография. М.: «Класс-М», 2007. 172 с.
7. Костров С.В., Веселов Г.В. Проблемы и направления формирования конкурентоспособных форм и способов организации грузовых перевозок на водном транспорте // Вестник Самарского государственного университета путей сообщения. 2012. №2. С. 31-36.
8. Сустретов С.В., Ничипорук А.О. Современное состояние и перспективы развития грузовых перевозок в судах инновационного типа // Научные проблемы водного транспорта. 2022. № 72(3). С. 144-155. DOI:10.37890/jwt.vi72.291
9. Домнина О.Л. Влияние санкций на перевозку грузов // Актуализация транспортной стратегии России как необходимое условие обеспечения экономического прорыва и национальной безопасности страны на этапах геополитического противостояния. Коллективная монография. Часть II. М.-Н.Новгород: ВГУВТ, 2023. С. 105-113.
10. Давыденко А.А. Концепция государственного управления конкурентоспособностью региональных морских портовых комплексов // Экономика и управление. 2008. №2. С. 121-125.
11. Фофанова А.Ю. Функционирование морского портового комплекса в региональной экономике (в экономике Мурманской области) // Региональные проблемы преобразования экономики. 2010. №1 (23). С. 63-71.
12. Болдорев А.Н. Вложение инвестиций в создание и развитие объектов инфраструктуры морских портов в рамках государственно-частного партнерства // Транспортное дело России. 2009. №6. С. 39-41.
13. Скрынник А. М. Формирование системы управления на водном транспорте Приазовья // 100 наций. 2004. № 5-6.
14. Холопов К.В. О транспортной стратегии Российской Федерации (международный аспект) // Актуализация транспортной стратегии России как необходимое условие обеспечения экономического прорыва и национальной безопасности страны на этапах

- геополитического противостояния. Коллективная монография. Часть I. М.-Н.Новгород: ВГУВТ, 2023. С. 135-138.
15. Малов В.Ю., Мелентьев Б.В. Транспортная система как объект государственного управления // Актуализация транспортной стратегии России как необходимое условие обеспечения экономического прорыва и национальной безопасности страны на этапах геополитического противостояния. Коллективная монография. Часть II. М.-Н.Новгород: ВГУВТ, 2023. С. 97–101.
  16. Синицын М.Г., Глоденис Т.В., Масленников С.Н. Перспективы внутреннего водного транспорта при освоении континентального шельфа РФ // Научные проблемы водного транспорта. 2022. №72(3). С. 134–143. DOI: 10.37890/jwt.vi72.292
  17. Курбатова А.В., Курбатова Е.С. Интеграция и улучшение государственного регулирования как важнейшее условие устойчивого развития отечественного речного транспорта // Актуализация транспортной стратегии России как необходимое условие обеспечения экономического прорыва и национальной безопасности страны на этапах геополитического противостояния. Коллективная монография. Часть II. М.-Н.Новгород: ВГУВТ, 2023. С. 16-24.
  18. Прокофьева Т.А. Кластерный подход к управлению развитием логистической инфраструктуры евроазиатских международных транспортных коридоров // Актуализация транспортной стратегии России как необходимое условие обеспечения экономического прорыва и национальной безопасности страны на этапах геополитического противостояния. Коллективная монография. Часть II. М.-Н.Новгород: ВГУВТ, 2023. С. 157-163.
  19. Бафанов А.П. Методический подход к обоснованию экономической устойчивости операторов комбинированных пассажирских перевозок // Научные проблемы водного транспорта. 2022. №72(3). С. 90–101. DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi278>

#### References

1. Botnaryuk M.V., Klassovskaya M.I. Opredelenie znachimosti indikatorov dostizheniya tselei pri postroenii sistemy upravleniya predpriyatii transportnoi otrasli v tsifrovoi ehkonomike [Determining the importance of indicators of achievement of goals in building a system of management of transport industry enterprises in the digital economy]. Morskije intellektualnye tekhnologii [Marine intelligent technologies]. 2021. №2-4(52). pp. 146–152.
2. Botnaryuk M.V., Kondrat'ev S.I. K voprosu o novykh napravleniyakh razvitiya portovoi infrastruktury [On the issue of new directions for the development of port infrastructure]. Vestnik GMU im. adm. F.F. Ushakova [Bulletin of the State Medical University named after Adm. F.F. Ushakova]. 2016. №1(14). pp. 47–49.
3. Kudryavtseva I.YU. Mesto vnutrennego kontrolya v sisteme upravleniya predpriyatiyami vodnogo transporta [Place of internal control in the management system of water transport enterprises]. Mirovye nauchnye issledovaniya sovremennosti: vozmozhnosti i perspektivy razvitiya. Materialy XVI mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [World scientific research of our time: opportunities and prospects for development. Materials of the XVI International Scientific and Practical Conference]. Vol. 1. Stavropol, 2022. pp. 649-652.
4. Kudryavtseva I.YU. Problemy organizatsii vnutrennego kontrolya na predpriyatiyakh vodnogo transporta [Problems of organizing internal control at water transport enterprises]. Trudy kongressa «Velikie reki» [Proceedings of the «Great Rivers» Congress]. N. Novgorod, 2020. URL: [http://vf-reka-more.rf/2020/PDF/13\\_6.pdf](http://vf-reka-more.rf/2020/PDF/13_6.pdf)
5. Korshunov D.A. Formirovanie infrastruktury kompleksa vnutrennego vodnogo transporta [Infrastructure Development of Inland Water Transport Complex]. Nauchnye problemy vodnogo transporta [Russian Journal of Water Transport]. 2022. №72(3). pp. 111–120. DOI:10.37890/jwt.vi72.289
6. Trotsenko R.V. Problemy modernizatsii infrastruktury rechnogo transporta Rossii. Monografiya [Problems of modernizing the infrastructure of river transport in Russia. Monograph]. M.: «Klass-M», 2007. 172 p.
7. Kostrov S.V., Veselov G.V. Problemy i napravleniya formirovaniya konkurentosposobnykh form i sposobov organizatsii gruzovykh perevozok na vodnom transporte [Problems and directions of formation of competitive forms and methods of organization of freight

- transportation by water transport]. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya [Bulletin of Samara State University of Railways]. 2012. №2. pp. 31-36.
8. Sustretov S.V., Nichiporuk A.O. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya gruzovykh perevozok v sudakh innovatsionnogo tipa [Current state and prospects for the development of freight transportation in innovative type vessels]. Nauchnye problemy vodnogo transporta [Russian Journal of Water Transport]. 2022. № 72(3). pp. 144-155. DOI:10.37890/jwt.vi72.291
  9. Domnina O.L. Vliyanie sanktsii na perevozku gruzov [The impact of sanctions on the transportation of goods]. Aktualizatsiya transportnoi strategii Rossii kak neobkhodimoe uslovie obespecheniya ehkonomicheskogo proryva i natsionalnoi bezopasnosti strany na ehtapakh geopoliticheskogo protivostoyaniya. Kollektivnaya monografiya [Updating the transport strategy of Russia as a necessary condition for ensuring an economic breakthrough and national security of the country at the stages of geopolitical confrontation. Collective monograph]. Vol. II. M.-N.Novgorod: VGUVT, 2023. pp. 105-113.
  10. Davydenko A A. Kontsepsiya gosudarstvennogo upravleniya konkurentosposobnostyu regionalnykh morskikh portovykh kompleksov [Concept of public administration of competitiveness of regional seaports]. Ehkonomika i upravlenie [Economics and governance]. 2008. №2. pp. 121-125.
  11. Fofanova A.YU. Funktsionirovanie morskogo portovogo kompleksa v regionalnoi ehkonomie (v ehkonomie Murmanskoi oblasti) [Functioning of the sea port complex in the regional economy (in the economy of the Murmansk region)]. Regionalnye problemy preobrazovaniya ehkonomiki [Regional problems of economic transformation]. 2010. №1 (23). pp. 63-71.
  12. Boldorev A.N. Vlozhenie investitsii v sozdanie i razvitie obektov infrastruktury morskikh portov v ramkakh gosudarstvenno-chastnogo partnerstva [Investment in the creation and development of infrastructure facilities of seaports within the framework of public-private partnership]. Transportnoe delo Rossii [Transport affairs of Russia]. 2009. №6. pp. 39-41.
  13. Skrynnik A. M. Formirovanie sistemy upravleniya na vodnom transporte Priazovya [Formation of the management system in the water transport of the Azov region]. 100 natsii [100 nations]. 2004. № 5-6.
  14. Kholopov K.V. O transportnoi strategii Rossiiskoi Federatsii (mezhdunarodnyi aspekt) [On the transport strategy of the Russian Federation (international aspect)]. Aktualizatsiya transportnoi strategii Rossii kak neobkhodimoe uslovie obespecheniya ehkonomicheskogo proryva i natsionalnoi bezopasnosti strany na ehtapakh geopoliticheskogo protivostoyaniya. Kollektivnaya monografiya [Updating the transport strategy of Russia as a necessary condition for ensuring an economic breakthrough and national security of the country at the stages of geopolitical confrontation. Collective monograph]. Vol I. M.-N.Novgorod: VGUVT, 2023. pp. 135-138.
  15. Malov V.YU., Melentev B.V. Transportnaya sistema kak ob"ekt gosudarstvennogo upravleniya [Transport system as an object of public administration]. Aktualizatsiya transportnoi strategii Rossii kak neobkhodimoe uslovie obespecheniya ehkonomicheskogo proryva i natsional'noi bezopasnosti strany na ehtapakh geopoliticheskogo protivostoyaniya. Kollektivnaya monografiya [Updating the transport strategy of Russia as a necessary condition for ensuring an economic breakthrough and national security of the country at the stages of geopolitical confrontation. Collective monograph]. Vol. II. M.-N.Novgorod: VGUVT, 2023. pp. 97-101.
  16. Sinitsyn M.G., Glodenis T.V., Maslennikov S.N. Perspektivy vnutrennego vodnogo transporta pri osvoenii kontinentalnogo shelfa RF [Prospects for inland water transport in the development of the continental shelf of the Russian Federation]. Nauchnye problemy vodnogo transporta [Russian Journal of Water Transport]. 2022. №72(3). pp. 134-143. DOI: 10.37890/jwt.vi72.292
  17. Kurbatova A.V., Kurbatova E.S. Integratsiya i uluchshenie gosudarstvennogo regulirovaniya kak vazhneishee uslovie ustoychivogo razvitiya otechestvennogo rechnogo transporta [Integration and improvement of state regulation as the most important condition for the sustainable development of domestic river transport]. Aktualizatsiya transportnoi strategii Rossii kak neobkhodimoe uslovie obespecheniya ehkonomicheskogo proryva i natsionalnoi bezopasnosti strany na ehtapakh geopoliticheskogo protivostoyaniya. Kollektivnaya monografiya [Updating Russia's transport strategy as a necessary condition for ensuring an

- economic breakthrough and national security of the country at the stages of geopolitical confrontation. Collective monograph]. Vol. II. M.-N.Novgorod: VGUVT, 2023. pp. 16-24.
18. Prokofeva T.A. Klasternyi podkhod k upravleniyu razvitiem logisticheskoi infrastruktury evroaziatskikh mezhdunarodnykh transportnykh koridorov [Cluster approach to managing the development of the logistics infrastructure of Euro-Asian international transport corridors]. Aktualizatsiya transportnoi strategii Rossii kak neobkhodimoe uslovie obespecheniya ehkonomicheskogo proryva i natsionalnoi bezopasnosti strany na ehtapakh geopoliticheskogo protivostoyaniya. Kollektivnaya monografiya [Updating Russia's transport strategy as a necessary condition for ensuring an economic breakthrough and national security of the country at the stages of geopolitical confrontation. Collective monograph]. Vol. II. M.-N.Novgorod: VGUVT, 2023. pp. 157-163.
19. Bafanov A.P. Metodicheskii podkhod k obosnovaniyu ehkonomicheskoi ustoichivosti operatorov kombinirovannykh passazhirskikh perevozok [Methodological approach to substantiation of economic stability of operators of combined passenger transportation]. Nauchnye problemy vodnogo transporta [Russian Journal of Water Transport]. 2022. №72(3). pp. 90–101. DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi278>

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Сухарев Дмитрий Николаевич**,  
руководитель службы, АО «Русатом  
Оверсиз», 115280, Москва, ул. Ленинская  
Слобода, д. 26, стр. 5, e-mail:  
[dnsukharev@rambler.ru](mailto:dnsukharev@rambler.ru)

**Dmitry N. Sukharev**, Head of Service, Rusatom  
Overseas JSC, 115280, Moscow, Leninskaya  
Sloboda str., 26, p. 5, e-mail:  
[dnsukharev@rambler.ru](mailto:dnsukharev@rambler.ru)

Статья поступила в редакцию 14.05.2023; опубликована онлайн 20.06.2023.  
Received 14.05.2023; published online 20.06.2023.

УДК 656.62

DOI: 10.37890/jwt.vi75.377

## **Современное состояние и перспективы речных пассажирских перевозок в Волжском бассейне**

**Ю.Н. Уртминцев**

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4534-4347>

**В.И. Минеев**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5079-7922>

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

**Аннотация.** Проведен анализ тенденций развития пассажирских перевозок в России за последние десятилетия. Отмечено значительное снижение объемов перевозок на речном транспорте и приведены причины этого явления. Выполнен анализ современного состояния речных пассажирских перевозок в Волжском бассейне. Представлены основные перевозчики и действующие пассажирские линии, обслуживаемые скоростными и водоизмещающими судами. Выявлено, что регулярные линии функционируют там, где речные маршруты позволяют существенно сократить расстояние перевозок. Проведено сравнение показателей энергоэффективности речных пассажирских судов по сравнению с автобусным сообщением. Отмечена необходимость государственной поддержки социально значимых перевозок. По результатам проведенного анализа формулируются предложения по выработке отраслевых решений в области речных пассажирских перевозок.

**Ключевые слова:** речной транспорт, пассажирские перевозки, Волжский бассейн, скоростные и водоизмещающие суда, социально значимые перевозки.

## **Current State and Prospects of River Passenger Transportation in the Volga Basin**

**Yuri N. Urtmintsev**

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4534-4347>

**Valery I. Mineev**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5079-7922>

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

**Abstract.** The analysis of trends in the development of passenger transportation in Russia over the past decades has been carried out. A significant decrease in the volume of river transportation has been noted and the reasons for this phenomenon are given. The analysis of the current state of river passenger transportation in the Volga basin is carried out. The main carriers and operating passenger lines served by high-speed and displacement vessels are presented. It has been revealed that regular lines operate where river routes can significantly reduce the distance of transportation. The comparison of the energy efficiency indicators of river passenger vessels compared to bus service is carried out. The necessity of the state support for socially significant transportation was noted. Based on the results of the analysis, proposals for the development of industry solutions in the field of river passenger transportation are formulated.

**Keywords:** river transport, passenger transportation, the Volga basin, high-speed and displacement vessels, socially significant transportation.

### Введение

Пассажи́рские перевозки всегда являлись важнейшей сферой деятельности внутреннего водного транспорта. Хорошо известно, что исторически населенные пункты возникали на берегах водных путей, и речной транспорт вплоть до середины 19 века оставался практически единственным видом сообщения для осуществления массовых перевозок людей и грузов.

Начиная с конца девятнадцатого, а особенно в двадцатом веке получили интенсивное развитие сухопутные виды транспорта, которые по мере строительства железных и автомобильных дорог постепенно взяли на себя основную долю грузовых и пассажирских перевозок.

Происходивший в конце двадцатого века социально-экономический кризис в нашей стране привел к спаду объемов перевозок, как грузовых, так и пассажирских, на всех видах транспорта. В начале нулевых годов, по мере восстановления экономики страны, объемы грузовых перевозок начали расти, но процесс падения объемов пассажирских перевозок продолжался. При этом темпы падения на разных видах транспорта существенно различались. Динамика пассажирских перевозок и общей протяженности путей в Российской Федерации с 1970 г. представлены в табл. 1 и 2 [1, 2, 3].

Таблица 1

**Динамика пассажирских перевозок, млн. пасс.**

Вид транспорта	Год				
	1970	1990	2000	2010	2020
Внутренний водный	116	90	28	16	8
Железнодорожный	2500	3140	1420	950	880
Автомобильный*	2850	5760	3680	1680	820

Примечание \* – междугородные и пригородные перевозки автобусами

Таблица 2

**Протяженность путей общего пользования, тыс. км**

Вид транспорта	Год				
	1970	1990	2000	2010	2020
Внутренний водный*	65	67	42	48	50
Железнодорожный	78	86	87	86	87
Автомобильный**	270	400	530	665	1100

Примечания: \* - с гарантированными глубинами; \*\* - дороги общего пользования с твердым покрытием

Как видно из приведенных таблиц, в конце 20-го – начале 21-го веков наибольшее развитие получила инфраструктура автомобильного транспорта. Общая протяженность автодорог увеличилась почти в 4 раза, а железнодорожных и водных путей осталась примерно на прежнем уровне. Соответственно, резко возросла территориальная доступность автотранспорта для пассажиров, а следствием стало переключение пассажирских потоков с внутреннего водного и железнодорожного на автомобильный транспорт. Объемы речных пассажирских перевозок упали более чем в 10 раз, а железнодорожных – почти три раза.

При этом следует отметить произошедшее в последние два десятилетия существенное снижение объемов пассажирских перевозок и на автомобильном общественном транспорте. Это объясняется интенсивным увеличением в стране в этот период парка легковых автомобилей личного пользования, что повлекло за собой снижение спроса на услуги общественного транспорта, особенно в пригородном сообщении.

## **Результаты**

На речном транспорте, осуществляющим пассажирские перевозки в Волжском бассейне, за рассматриваемый период также произошли очень большие изменения. В советское время в каждом областном центре функционировали по несколько регулярных пассажирских линий, которые обслуживали как местные (внутриобластные), так и межобластные маршруты. На относительно коротких маршрутах использовались водоизмещающие суда пассажироместимостью от 150 до 250 чел. («Москвич» - пр. 839, «ОМ» - пр. 935, «Москва» – пр. Р-51, «Московский» – пр. 81080 и др.). На более дальних маршрутах работали суда на подводных крыльях («Ракета» – пр. 340, «Метеор» – пр. 342Э, «Восход» – пр. 352 и др.).

Ниже рассмотрены более подробно два вида пассажирских речных перевозок в Волжском бассейне – скоростные перевозки в судах на подводных крыльях и перевозки в водоизмещающих судах (экскурсионно-туристические маршруты имеют иное социально-экономическое содержание и в настоящей работе не рассматриваются).

### ***Скоростные пассажирские перевозки***

Пассажирские линии, обслуживаемые судами на подводных крыльях, обеспечивали высокие скорости доставки (даже по сравнению с сухопутными видами сообщения) и пользовались в советский период большим спросом у населения. Так, только в Нижегородской области существовало более 10 регулярных маршрутов, причем весьма протяженных (до Ульяновска, Казани, Чистополя, Чебоксар, Костромы, Ярославля, Рыбинска и др.), обслуживаемые примерно 30-ю скоростными судами. Цена на проездной билет, как правило, находилась на уровне стоимости поездки автобусом или поездом. При этом следует отметить, что объективно себестоимость перевозок на скоростных судах заметно превышает аналогичную себестоимость автобусного сообщения вследствие более высоких энергозатрат (при одинаковой пассажироместимости мощность главных двигателей скоростного судна примерно в 3 раза больше, чем у автобуса).

В условиях плановой экономики советского периода фактически все речные скоростные пассажирские перевозки дотировались государством (на уровне регионов). После перехода к рыночному механизму ценообразования тарифы на этих перевозках при примерно одинаковой дальности стали неконкурентоспособными по отношению к автобусному сообщению (при перевозках «вдоль реки»). Эксплуатация скоростных судов без государственной дотации приводила к большим убыткам перевозчиков. В результате практически весь скоростной флот в начале 90-х годов был выведен из эксплуатации.

В настоящее время в Волжском бассейне эксплуатируются всего 4 судна на подводных крыльях старой постройки (конца 80-х годов). Три судна эксплуатирует судоходная компания «Татфлот» (г. Казань) и одно судно – СК «Рыбинские пассажирские линии». Суда используются на линиях протяженностью до 100 км, связывающих пункты, расположенные, как правило, на противоположных берегах р. Волги. При этом речные маршруты позволяют существенно сократить расстояние перевозок и, соответственно, время поездки пассажиров по сравнению с альтернативными автобусными схемами сообщения. Вместе с тем, учитывая высокие удельные энергетические затраты судов на подводных крыльях, рассматриваемые маршруты как социально-значимые и в настоящее время получают дотации из региональных бюджетов, что позволяет сделать стоимость проезда доступной для населения.

В последние годы отечественное судостроение возобновило строительство скоростного флота. В период с 2017 г. были построены суда типа «Валдай-45Р» (пр.23180) – 16 ед. и «Метеор-120Р» (пр. 03580) – 3 ед. Все суда построены по лизинговой схеме финансирования. В Волжском бассейне суда серии «Валдай»

эксплуатируются судоходной компанией «ВОДОЛЕТ» (Н. Новгород), судоходной компанией «Волга-Трэвэл» (г. Самара) и АО «Чебоксарский речной порт» (г. Чебоксары). Суда «Метеор-120Р» эксплуатирует в Обь-Иртышском бассейне компания «Северречфлот» (г. Ханты-Мансийск).

Сфера использования судов «Валдай» и выполненные ими перевозки в навигацию 2020 г. показаны в табл. 3. Анализ проведен на основе информационной базы Администрации Волжского бассейна внутренних водных путей.

Таблица 3

**Пассажирские перевозки скоростным флотом в Волжском бассейне**

№ п/п	Наименование компании	Колич. перев. тыс. пасс.	Число рейсов*	Состав флота	Сфера работы	Среднее расст. перевозки, км	Период работы
1.	Водолет	58,6	1190	Валдай-45Р (пр.23180) – 4 ед.	Нижегородская обл., Нижний Новгород	50	Май - октябрь
2.	Волга-Трэвэл	н/д	н/д	Валдай-45Р (пр.23180) – 4 ед.	Самарская обл.	35	Май - октябрь
3.	Чебоксарский порт	18,2	480	Валдай-45Р (пр.23180) – 3 ед.	Линия Чебоксары - Казань	140	Июнь – начало сентября

Примечание: \* - число рейсов указано в сумме в оба направления

Практически все маршруты использования судов на подводных крыльях являются туристическими и обеспечивают возможность посещения культурных центров и разного рода достопримечательностей своего региона, но не перевозками пассажиров в классическом понимании таковых. Маршрут АО «Чебоксарский порт» между Казанью и Чебоксарами частично выполняет функцию пассажирской линии, что позволило руководству порта привлечь дотации из регионального бюджета.

**Пассажирские перевозки в водоизмещающих судах**

Эксплуатацию пассажирского водоизмещающего флота с организацией достаточно регулярных пассажирских маршрутов (линий) в настоящее время осуществляют всего лишь несколько компаний, представленных в табл.4.

Таблица 4

**Пассажирские перевозки водоизмещающим флотом (2020 г.)**

№ п/п	Наименование компании	Колич. перев. тыс. пасс.	Число рейсов	Состав флота	Сфера работы	Средн. расст. перевозки, км	Период работы
1.	Астраханьпассажир-сервис (г. Астрахань)	13	166	Москва (пр. Р51Э) – 1 ед.	Местные перевозки	12	Июль – начало октября
2.	Демос СК (г. Ульяновск)	44	530	Московский (пр.81080) - 1 ед.	местные	5	Конец июня - сентябрь
3.	Татфлот (г. Казань)	122	1580	Москва (пр. Р51Э) – 5 ед. МО (пр.839А) –	местные	24	Май – начало ноября

				1 ед. ОМ (пр.780) – 1 ед.			
4.	Порт Тольятти	34	840	ОМ (пр.780) – 1 ед., МО (пр.839А) – 1 ед.	местные	26	Июнь - октябрь
5.	Ярославский речной порт	132	673	Москва (пр.Р51Э) – 1 ед.	местные	60	Конец июня – начало сентября

Анализ приведенных в табл. 4 маршрутов показывает, что водоизмещающие суда используются на относительно коротких линиях, связывающих пункты, расположенные на противоположенных берегах р. Волги, либо пункты, расположенные на территориях, не позволяющих вследствие рельефа местности проложить короткие сухопутные пути сообщения между пунктами. В этих случаях речные маршруты позволяют существенно сократить расстояние перевозок и за счет этого, несмотря на более низкую скорость движения, сократить время поездки пассажира.

На региональных пассажирских перевозках основную конкуренцию речному транспорту составляет автомобильный (автобусное сообщение).

Как известно, на выбор вида сообщения пассажиром влияют два основных фактора:

- стоимость проезда;
- время поездки, включающее все затраты времени от места начальной дислокации пассажира до места назначения (в т.ч. время перемещения до/от пунктов посадки-высадки, время ожидания подачи транспортных средств и т.д.).

В формировании стоимости проезда существенную роль играет топливная составляющая. Поэтому целесообразно сравнить энергоэффективность скоростных и водоизмещающих судов с аналогичной характеристикой автобусов. Параметром для оценки удельной энергоэффективности может служить величина пассажирооборота, приходящаяся на единицу мощности транспортного средства за единицу времени. Результаты расчета этого показателя для рассматриваемых транспортных средств представлены в табл.5.

*Таблица 5*

**Сравнение транспортных средств по критерию энергетической эффективности**

Тип транспортного средства	Проект	Пассажиро-вместимость, чел*	Мощность, л.с.	Скорость, км/ч	Удельная энергоэффективность, пасс-км/л.с.-ч
Водоизмещающие суда					
Москва	Р-51ЭА	225	300	24	18
ОМ	935	230	435	22,5	11,4
Московский	81080П	150	300	20	10,0
Скоростные суда					
Метеор	342Р	124	1700	65	4,7
Ракета	340Э	64	1000	60	3,8
Восход	352	71	1100	60	3,9
Валдай	23180	45	1100	65	2,7
Автобус**		40	250	60***	9,0

Примечания: \* в результате модернизации пассажировместимость отдельных судов может отличаться;

\*\* - приведены усредненные характеристики автобуса на пригородном сообщении;

\*\*\* - средняя скорость движения автобуса в пригородном сообщении

Как видно из таблицы 5, энергоэффективность судов на подводных крыльях в два-три раза ниже, чем подвижного состава автомобильного транспорта (пригородных автобусов), что существенно влияет на себестоимость перевозок. Также при примерно одинаковой скорости движения тех и других транспортных средств по магистральным путям речное сообщение связано, в общем случае, с дополнительными издержками (времени и денежных затрат) на доставку пассажира до/от речного вокзала. Поэтому использование скоростных судов пассажирами для регулярных поездок, как правило, не находит применения. Очевидно, что реальной основной сферой деятельности для этого флота есть и будут – экскурсионно-прогулочные рейсы и маршруты. Но при условии социальной важности тех или иных маршрутов перевозок и, соответственно, определенном дотировании перевозчика, регулярные маршруты будут пользоваться спросом у пассажиров.

Водоизмещающие суда по энергоэффективности несколько превосходят альтернативный автобусный вид сообщения. Как было отмечено выше, речные маршруты часто позволяют существенно сократить расстояние перевозок и общее время поездки (особенно на маршрутах «поперек реки»). При этом для повышения привлекательности речных линий предприятиям водного транспорта следует уделять больше внимания вопросам взаимодействия со смежными перевозчиками (подвоз/довоз до/от речного причала, согласование расписаний движения), т.е. внедрять мультимодальные технологии перевозок.

Сегодня отсутствуют концепции научного обоснования размеров дотаций различных видов пассажирского транспорта на основе определения не только коммерческого, но и комплексного социально-экономического эффекта [6]. При оценке эффективности и определении объема субсидирования социально-значимых пассажирских перевозок необходимо учитывать то обстоятельство, что развитие внутреннего водного транспорта приносит эффект не только в транспортной отрасли, но и за ее пределами [8].

Концептуально предельный уровень дотирования пассажирских перевозок может быть определен из условия:

$$R_{\text{дот}}^{\text{max}} = \sum_i^n F_i \quad (1)$$

где:  $R_{\text{дот}}^{\text{max}}$  - максимальный размер дотирования убытков при освоении пассажирских перевозок;

$\sum_i^n F_i$  - сумма внутранспортных эффектов в смежных отраслях народного хозяйства и в социальной сфере.

В качестве примеров внутранспортного эффекта можно привести: величину бюджетных расходов на строительство и содержание автодорог, степень обеспечения предприятий региона квалифицированной рабочей силой, развитие экскурсионно-туристического бизнеса, развитие личных подсобных (садоводческих) хозяйств и т.д.

Примерами социального эффекта могут быть: сокращение общего времени поездки, повышение безопасности перевозок, рост социально-экономической активности населения в регионе, расширение доступности выбора молодежью образовательного учреждения и т.д.

Методы комплексной количественной оценки этих эффектов нуждаются в научной проработке.

### **Заключение**

Анализ современного состояния речных пассажирских перевозок в Волжском бассейне позволяет сделать некоторые общие выводы.

1. Общие объемы речных пассажирских перевозок в регионах с развитой инфраструктурой сухопутных сообщений резко снизились вследствие перехода большей части перевозок на автомобильный и железнодорожный виды транспорта, а также массового использования населением личного автотранспорта.
2. Для оценки перспектив развития пассажирских перевозок на внутреннем водном транспорте следует провести исследования по научному обоснованию сферы рационального использования этого вида сообщения. При этом в качестве критерия оценки схем сообщения должен быть принят комплексный (интегральный) показатель, учитывающий не только себестоимость перевозок, но и эффект в смежных отраслях экономики и социальной сфере.
3. В настоящее время в стране и регионах нет четких и единых критериев для выделения категории социально-значимых пассажирских перевозок и маршрутов. Вопрос о возможности и целесообразности государственной дотации тех или иных перевозок решается администрациями регионов часто весьма субъективно. Поэтому целесообразно выработать единый методический подход для выделения данной категории перевозок и определения целесообразных видов и объемов государственной поддержки.
4. Для повышения привлекательности и доступности для пассажиров транспортных маршрутов с участием внутреннего водного транспорта следует шире использовать мультимодальные технологии и современные информационные платформы.

Проведение вышеназванных исследований и внедрение современных технологий перевозок будут способствовать реализации целей, поставленных федеральными стратегическими программами в части развития пассажирских перевозок на внутреннем водном транспорте [4, 5].

### **Список литературы**

1. Российский статистический ежегодник. Статистический сборник / Госкомостат России – М., 1995. - 976 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://istmat.org/node/45492>
2. Основные показатели транспортной деятельности в России: Федеральная служба государственной статистики - 2004 г. [Электронный ресурс] - Режим доступа: [https://gks.ru/bgd/regl/B04\\_55/Main.htm](https://gks.ru/bgd/regl/B04_55/Main.htm)
3. Транспорт в России: информационно-статистические сборники Федеральной службы государственной статистики. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/dokument/13229>.
4. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 г с прогнозом на период до 2035 г.: Распоряжение Правительства РФ от 27 ноября 2021 г. №3363р.
5. Стратегия развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года: Распоряжение Правительства РФ от 29 февраля 2016 г. N 327-р.
6. Кузьмичев И.К. Задачи научных исследований в области пассажирских перевозок на речном транспорте / Кузьмичев И.К., Корнев А.Б., Малышкин А.Г. // Вестник ВГАВТ. - 2017. - Вып. 50. – С. 182-190.
7. Веселов Г.В. Современное состояние пассажирских перевозок в Российской Федерации / Веселов Г.В., Карташов М.В., Минеев В.И. // Вестник ВГАВТ. - 2019. - Вып. 58. – С. 144-151.

8. Веселов Г.В. Обоснование целесообразности дотирования высокоскоростных водных пассажирских перевозок в Приволжском федеральном округе. / Веселов Г.В., Иванов М.В., Минеев В.И., Митрошин С.Г. // Вестник ВГАВТ. - 2018. - Вып. 55. – С. 119-124.

#### References

1. Russian statistical annual. Statistical collection / Goskomostat Rossii-M., 1995. - 976 PP. [Ambiglectron undeclared Resource] - Access mode: <https://istmat.org/node/45492>
2. Mainservice indicators of transport activities in Russia: Federal Office of state statistics-2004 [Ambiglectron undeclared Resource] - Access mode: [https://gks.ru/bgd/regl/B04\\_55/Main.htm](https://gks.ru/bgd/regl/B04_55/Main.htm)
3. Transport in Russia: information and statistics of the Federal Service. [Ambiglectron undeclared Resource] - Access mode: <https://rosstat.gov.ru/Apostille/210/apostille/13229>.
4. Transport strategy the Russian Federation to 2030 with a forecast period until 2035: Russian government of November 27, 2021 3363r.
5. Development strategy in the Russian water transport Federations for the period to 2030: Russian governments of February 29, 2016 327-P.
6. Kuzmichev I.K. Tasks scientific and research activities in the areas of passazhirskikh River transporte / Kuzmichev and K. Kornev A.B., Malabrashkin A.G. // VGAUT newspaper. - 2017. - I'm going to dad's. 50. - S. 182-190.
7. Veselov G.V. In the Russian Federation / Veselov G.V. Kartashov M.V., Minaev V.And. // VGAUT newspaper. - 2019. - I'm going to dad's. 58. - S. 144-151.
9. Veselov G.V. Justification purposesconsumption of payments in paralympicsoco-speed urgencies in the Volga Federal District. Veselov G.V., Ivanov M.V., Minaev V.And., Mitroshin S.G. // VGAUT newspaper. - 2018. - I'm going to dad's. 55. - S. 119-124.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**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](mailto: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

**Минеев Валерий Иванович**, профессор, д.э.н., кафедра экономики и менеджмента, Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия, e-mail: [vlrjmineev@gmail.com](mailto:vlrjmineev@gmail.com)

**Valery I. Mineev**, Doctor of Economics, Professor, Department of Economics and management, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 10.05.2023; опубликована онлайн 20.06.2023.  
Received 10.05.2023; published online 20.06.2023.

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА,  
СУДОВОЖДЕНИЕ И БЕЗОПАСНОСТЬ СУДОХОДСТВА**

**OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION AND  
SAFETY OF NAVIGATION**

УДК 656.6; 338.58

DOI: 10.37890/jwt.vi75.367

**Оценка эффективности комбинированных судов**

**Ю.И. Платов**

<https://orcid.org/0000-0003-1758-1684>

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

**Аннотация.** Статья посвящена оценке эффективности комбинированных судов и определению сферы их оптимального использования при обосновании строительства новых судов для повышения конкурентоспособности внутреннего водного транспорта. Для этого предложены подходы и показатели оценки использования комбинированных и традиционных (сухогрузных и наливных) судов при принятии решения об их строительстве при стратегическом планировании или приобретении уже существующих судов при текущем планировании. Новизна оценки заключается в учете специфики эксплуатации комбинированного судна, которая предусматривает оценку эффективности дополнительных капложений в него, генерирующих дополнительные доходы и эксплуатационные расходы, возникающие в результате обратной загрузки судна, а также в возможности сравнения этой эффективности с соответствующими показателями эксплуатации сухогрузных и наливных судов на альтернативных грузопотоках. Дополнительно, для исследования влияния факторов эффективности и более адекватной оценки, определяется фрахтовая ставка обратного грузопотока, обеспечивающая равную рентабельность с прямым грузопотоком. Оценка эффективности судов и работоспособность предлагаемого подхода показаны на ряде реальных грузопотоков Центрального и Северо-Западного бассейнов. На основе анализа показателей установлены границы эффективности использования комбинированных судов на конкретных участках работы.

**Ключевые слова:** комбинированные суда, обратная загрузка, стоимость перевозок, дополнительные капложения, амортизация, фрахтовые ставки прямого и обратного грузопотоков, эффективность судов, границы эффективности грузоперевозок.

**Evaluation of combined ships efficiency**

**Juri I. Platov**

<https://orcid.org/0000-0003-1758-1684>

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

**Abstract.** The article is dedicated to estimation of combined ships efficiency and determining the scope of their optimal use by preliminary new ships design to increase the competitiveness of inland water transport. For this, the author proposes approaches and indicators for assessing the use of combined and traditional (dry cargo and tanker) vessels when deciding on their construction in strategic planning or acquisition of existing vessels in current planning. The assessment novelty lies in considering the specifics of a combined vessel operation, which provides for an assessment of the efficiency of additional capital investments in it, generating additional incomes and operating costs arising from the vessel return trip loading, as well as the possibility of comparing this efficiency with the corresponding indicators of dry cargo ships and tankers operation on alternative cargo flows.

Additionally, in order to study the efficiency factors influence and a more adequate assessment, the freight rate of the reverse cargo flow is determined, which ensures equal profitability with the direct cargo flow. Evaluation of ships efficiency and the operability of the proposed approach are shown on a number of real cargo flows in the Central and Northwestern basins. Based on indicators analysis, the boundaries of the efficiency of combined vessels use in specific work areas have been established.

**Keywords:** combined ships, return trip loading, transportation cost, additional capital investments, depreciation, freight rates of forward and reverse cargo flows, vessel efficiency, cargo transportation efficiency boundaries.

### **Актуальность**

Стратегия развития внутреннего водного транспорта (ВВТ) [1, 2] предусматривает комплекс мер, связанных с обновлением транспортного флота и повышением его эффективности. Одним из направлений повышения эффективности является использование комбинированных судов (КС), осуществляющих перевозки с обратной загрузкой, что обеспечивает сокращение порожних пробегов. Как показывает практика применения таких судов, в прямом направлении перевозятся нефтеналивные грузы, фрахтовые ставки которых, за редким исключением, в несколько раз превышают ставки в обратном направлении (например, при северном завозе и вывозе грузов). При этом суммарное время груженых и порожних рейсов в обратном направлении может превышать продолжительность прямого рейса. Учитывая, что стоимость КС при прочих равных условиях может быть выше стоимости взятых в отдельности наливного и сухогрузного судов одного класса, необходимо исследовать эффективность его эксплуатации. В этой связи требуются методики и показатели оценки эффективности КС как инвестиционного проекта. Это даст возможность более адекватно определять эффективность КС при принятии решений об их строительстве, а в дальнейшем, и об оптимальной их расстановке по участкам работы при эксплуатации с учетом альтернативных нефтеналивных и сухогрузных судов.

### **Формулирование проблемы**

Сложность оценки эффективности эксплуатации новых судов обусловлена рядом факторов. Очевидным и бесспорным является то, что обратная загрузка КС обеспечивает дополнительные доходы, снижает себестоимость перевозок, повышает экологичность перевозок грузов, но это происходит за счет удорожания КС и увеличения эксплуатационных расходов. При этом последние возрастают за счёт увеличения амортизации, роста простоев, связанных с грузовыми работами и их ожиданиями, дополнительных расходов на топливо в обратном груженом рейсе и других факторов, отличающих КС от обычных судов [3]. Увеличение эксплуатационных расходов происходит даже при совпадении пунктов погрузки и выгрузки в прямом и обратном рейсах. Это также относится и к случаю, если обратный груженный рейс по графу участков водных путей находится внутри прямого. При несовпадении же графов продолжительность обратных рейсов может намного превышать время прямого рейса, что также приводит к дополнительным расходам. Как следствие описанных факторов и соотношения фрахтовых ставок прямого и обратного направлений, эффективность КС в ряде случаев может быть ниже, чем у наливного судна, что является решающим обстоятельством при выборе новых судов для судоходного предприятия (СП). Поэтому, исходя из интересов СП, эффективность дополнительных капложений в КС необходимо рассчитывать отдельно и сравнивать её с эффективностью наливного и сухогрузного судов. Что касается текущего планирования, если исходить из интересов одного, отдельно взятого СП, критерием может выступать максимум прибыли по всем грузопотокам, на

освоении которых используются имеющиеся у этого СП суда (и комбинированные, и наливные, и сухогрузные), который должен достигаться за счет минимизации себестоимости перевозок грузов.

Если исходить из интересов общества в целом, то эффективность дополнительных капитальных (ДК) вложений в КС необходимо однозначно определять по минимуму стоимости перевозок грузов [4] по сравнению с нефтеналивным и сухогрузным судами, близкими по своим характеристикам корпуса, мощности, грузоподъемности и др.

Однако при определении эффективности КС безотносительно к субъектности, необходимо учитывать условия, диктуемые рынком. В этом случае рассчитываются два варианта эксплуатации КС: с обратной загрузкой и без неё. При этом, если обратный грузопоток является конкурирующим, т.е., прямым или обратным для сухогрузного судна, то фрахтовая ставка, как правило, снижается по сравнению со среднерыночной. Поэтому при обосновании использования КС для СП важно находить граничные условия эффективности на конкретных грузопотоках через уровень фрахтовых ставок обратных рейсов, соответствующий рентабельности прямого. При этом фрахтовая ставка должна находиться, исходя из средней ставки для прямого и обратного грузопотоков, обеспечивающей заданный уровень рентабельности капитальных вложений.

#### **Методы и алгоритм оценки эффективности**

Эффективность новых судов зависит от трех основных показателей: стоимости судна (капвложений), доходов и расходов, которые формируют итоговые денежные потоки судна (ДПС) в течение всего его жизненного цикла (расчетного периода). На их основе рассчитываются показатели эффективности в соответствии с методическими рекомендациями по оценке эффективности инвестиционных проектов [5], в которых предусмотрено изменение величин денежных потоков по каждому году. Учитывая, что прогнозные величины ДПС в каждом году жизненного цикла нового судна определяются с некоторой неопределённостью, то с допустимой погрешностью, которая нивелируется при сравнении вариантов судов, можно принять средние прогнозные величины потоков, не меняя принципов методических рекомендаций. В результате такого подхода расчеты существенно упрощаются, что дает возможность использовать таблицы Excel. Расчётные формулы применительно к такому подходу в авторской интерпретации приводятся ниже.

Исходя из того обстоятельства, что в течение жизненного цикла судна его эксплуатационные качества ухудшаются, в результате чего прогнозные доходы уменьшаются, а эксплуатационные расходы возрастают, то учет таких прогнозных тенденций при расчете средних величин осуществляется по следующим выражениям:

$$D_{\text{ср}} = \frac{D_{\text{н}}(1 - (1 - \nabla)^{T_p})}{T_p \nabla}, \quad (1)$$

$$C_{\text{ср}} = \frac{C_{\text{н}}((1 + \Delta)^{T_p} - 1)}{T_p \Delta}, \quad (2)$$

где  $D_{\text{ср}}, D_{\text{н}}$  – соответственно доходы средние по годам расчетного периода и в начальный год эксплуатации судна, тыс. руб.;

$C_{\text{ср}}, C_{\text{н}}$  – соответственно, расходы средние по годам расчетного периода и в начальный год эксплуатации судна, тыс. руб.;

$\nabla, \Delta$  – соответственно прогнозные темпы уменьшения доходов и увеличения расходов, доли ед.;

$T_p$  – расчетный или нормативный период эксплуатации судна, лет.

Доходы и расходы за расчетный период эксплуатации судна определяются, соответственно, по следующим выражениям:

$$D_{\text{тп}} = D_{\text{ср}} E_a, \quad (3)$$

$$C_{\text{тп}} = C_{\text{ср}}, \quad (4)$$

где  $E_a$  – единичный аннуитет (сумма коэффициентов дисконта за расчетный период), доли ед.;

$$E_a = (1 - \frac{1}{(1 + d)^{T_p}}) / d,$$

где  $d$  – норма дисконта, доли ед.

В случае отсутствия льгот [6] интегральный экономический эффект определяется по следующему выражению:

$$\mathcal{E}_T = (D_{\text{тп}} - C_{\text{тп}} - I_{\text{тп}})(1 - H_{\text{пр}}) + A_{\text{тп}} - K_c, \quad (5)$$

где  $\mathcal{E}_T$  – интегральный экономический эффект от эксплуатации судна, тыс. руб.;

$I_{\text{тп}}$  – суммарный налог на имущество за прогнозный период, тыс. руб.;

$H_{\text{пр}}$  – налог на прибыль, доли ед.;

$A_{\text{тп}}$  – сумма амортизационных отчислений за расчетный период эксплуатации судна, тыс. руб.;

$K_c$  – стоимость судна, тыс. руб.

Налог на имущество и амортизационные отчисления определяются, соответственно, по следующим выражениям:

$$I_{\text{тп}} = I_{\text{ср}} E_a,$$

$$A_{\text{тп}} = K_c a_n E_a,$$

$$I_{\text{ср}} = K_c (1 - 0,5 T_p a_n) H_n,$$

где  $I_{\text{ср}}$  – среднегодовой налог на имущество, тыс. руб.;

$a_n$  – норма амортизационных отчислений, доли ед.;

$H_n$  – норма налога на имущество, доли ед.

При льготировании новых судов в соответствии с действующим налоговым законодательством [6] налоги на имущество и прибыль в формуле (5) и во всех последующих формулах принимаются равными нулю.

Сроки окупаемости (лет) не дисконтированный  $T_{\text{ок}}^H$  и дисконтированный  $T_{\text{ок}}^D$ , индекс рентабельности  $I_p$  (доли ед.) определяются, соответственно, по следующим выражениям:

$$T_{\text{ок}}^H = \frac{K_c}{(D_{\text{ср}} - C_{\text{ср}} - I_{\text{ср}})(1 - H_{\text{пр}}) + a_n K_c}, \quad (6)$$

$$T_{\text{ок}}^D = \frac{\ln \left( \frac{(D_{\text{ср}} - C_{\text{ср}} - I_{\text{ср}})(1 - H_{\text{пр}}) + a_n K_c}{(D_{\text{ср}} - C_{\text{ср}} - I_{\text{ср}})(1 - H_{\text{пр}}) + a_n K_c - d K_c} \right)}{\ln(1 + d)}, \quad (7)$$

$$I_p = \frac{\mathcal{E}_T}{K_c}, \quad (8)$$

Полноценное обоснование эффективности КС невозможно без показателей рентабельности: по валовой прибыли  $\rho_{\text{п}}$  (доли ед.), относительной экономической

прибыли  $\rho_{\text{оэп}}$  (доли ед.) и внутренней нормы доходности  $e_{\text{вн}}$  (доли ед.). Определяются они следующим образом.

$$\rho_{\text{п}} = \frac{D_{\text{ср}} - C_{\text{ср}}}{C_{\text{ср}}} = \frac{\Pi_{\text{в}}}{C_{\text{ср}}}, \quad (9.1)$$

$$\rho_{\text{оэп}} = \frac{(D_{\text{ср}} - C_{\text{ср}} - I_{\text{ср}})(1 - H_{\text{пр}}) + a_{\text{н}}K_{\text{с}}}{K_{\text{с}}} - \rho_{\text{а}}, \quad (9.2)$$

где  $\Pi_{\text{в}}$  – валовая прибыль, тыс. руб.;

$\rho_{\text{а}}$  – рентабельность активов предприятия, доли ед. В зависимости от целей анализа, в качестве нее может быть принята рентабельность альтернативных новых или существующих судов, а также кредитная ставка.

Внутренняя норма доходности  $e_{\text{вн}}$  наиболее простым способом определяется с помощью Excel методом подбора нормы дисконта: ее величина изменяется до тех пор, пока интегральный экономический эффект не станет равным нулю, т.е.,  $e_{\text{вн}} = d_{\text{р}}$ : при этом условии  $\Delta_{\text{т}} \cong 0$ .

Особое значение имеет оценка эффективности дополнительных капложений в КС, используемое на обратном грузопотоке, которые генерируют дополнительные ДПС. В этом случае необходимо выделять затраты времени и эксплуатационные расходы, относящиеся к обратному грузопотоку, что требует дополнительной методики. Поэтому, на наш взгляд, без существенного снижения погрешности можно поступить следующим образом. Подбираются два судна с близкими по эксплуатационным характеристикам к КС. Одно судно – нефтеналивное, используемое на прямом грузопотоке, другое – сухогрузное, для освоения обратного грузопотока. Далее определяются разницы между КС и выбранными судами для следующих величин:  $\Delta K_{\text{с}}, \Delta D_{\text{тп}}, \Delta C_{\text{тп}}, \Delta I_{\text{тп}}, \Delta A_{\text{тп}}$ .

При этом сначала определяется  $\Delta K_{\text{с}}$ , а далее, исходя из нее, по формулам (3) ÷ (9.1,9.2) рассчитываются и сравниваются показатели эффективности сравниваемых судов.

Как было отмечено выше, для более глубокой оценки при выборе новых судов необходимо определять и уровень фрахтовой ставки (ФС) обратного грузопотока, соответствующий рентабельности прямого.

Значение ставки определяется по следующему выражению:

$$f_{\text{об}} = f_{\text{ср}} \frac{Q_{\text{з}}^{\text{пр}} + Q_{\text{з}}^{\text{об}}}{Q_{\text{з}}^{\text{об}}} - f_{\text{пр}} \frac{Q_{\text{з}}^{\text{пр}}}{Q_{\text{з}}^{\text{об}}}, \quad (10)$$

где  $Q_{\text{з}}^{\text{пр}}, Q_{\text{з}}^{\text{об}}$  – соответственно, эксплуатационная загрузка судна в прямом и обратном рейсах, т;

$f_{\text{пр}}, f_{\text{об}}, f_{\text{ср}}$  – значения фрахтовых (доходных) ставок, соответственно, прямого и обратного грузопотоков и среднее значение для обоих, руб./т.

Средняя ставка, согласно [4], определяется по следующему выражению:

$$f_{\text{ср}} = S + \text{и} + \left( \rho_{\text{с}} + \frac{d}{1 - (1 + d)^{-T_{\text{н}}}} - a_{\text{н}} \right) \frac{K_{\text{с}}}{(1 - H_{\text{пр}})G_{\text{н}}}, \quad (11)$$

где  $S$  – себестоимость перевозок грузов на заданных направлениях, руб./т;

$\rho_{\text{с}}$  – задаваемая рентабельность отдачи капложений (основных фондов), доли ед.;

$\text{и}$  – удельный средний налог на имущество ( $\text{и} = I_{\text{ср}}/G_{\text{н}}$ ), руб./т;

$G_{\text{н}}$  – навигационная или годовая масса перевозимого груза, тыс. т.

Для более глубокого анализа при обосновании стоимости новых судов и, особенно, цены купли-продажи существующих судов, важно определить предельную стоимость судна для заданных грузопотоков  $\Pi_{\text{ср}}$  (тыс. руб.), при которой экономический эффект будет равен нулю. Следовательно, договорная цена судна

должна быть ниже предельной. Предельная стоимость определяется по следующему выражению:

$$C_{\text{сп}} = (D_{\text{тп}} - C_{\text{тп}} - I_{\text{тп}}) (1 - H_{\text{пр}}) + A_{\text{тп}}. \quad (12)$$

### Расчет показателей эффективности

Для проверки работоспособности и адекватности методики выбора судов нами были рассчитаны показатели по ряду направлений перевозок нефтегрузов, на которых возможно использование конкурирующих комбинированных и нефтеналивных и сухогрузных судов [5, 7]. Эти показатели были рассчитаны по льготному варианту. Из всех возможных участков работы нами были выбраны варианты с разным соотношением пробегов как прямого и обратного рейсов, так и порожнего и гружёного пробега обратного рейса. Общие исходные данные и основные результаты расчетов по выбранным линиям приведены в табл. 1, 2, 3.

Дадим пояснения к некоторым исходным данным, алгоритмам расчетов показателей и принятым допущениям, приведенным в табл. 1, 2, 3.

Таблица 1

#### Исходные данные

№ п/п	Показатели	Направления		Типы судов			Общие
		Север	Юг	RST-54	RST-27	RSD-44	
1	Строительная стоимость судна, млн. руб.			950	800	750	
1.1	Стоимость судна пр. RST-54, отнесенная на период, млн. руб.	633	774				
1.2	Стоимость судна пр. RST-27, отнесенная на период, млн. руб.	424	518				
2	Условно-постоянные суточные расходы, тыс. руб.			345	325	315	
3	Средняя стоимость топлива, тыс. руб./т			50	50	50	
4	Период эксплуатации по условиям плавания, сут.			270	340	270	
5	Жизненный цикл судна (расчетный период), лет			30	30	30	
6	Период эксплуатации по направлениям, сут.	180	220				
7	Норма дисконта, %						10
8	Рентабельность капиталовложений, %						5
9	Норма амортизации, %						3,9

Таблица 2

Принятые в расчетах значения фрахтовых ставок перевозок грузов

№ п/п	Участки работы в прямых и обратных рейсах	Род груза в рейсах		Значения ставок в рейсах, руб./т					Соотношение, %	
		прямым	обратном	принятые			расчетные		заданное	расчетное
				прямым	обратном	средняя	обратном	средняя		
Северное направление										
1	Ярославль – Высоцк, Питкяранта – Тверь (обр.)	мазут	щебень	2777	920	1868	2315	2551	3,02	1,20
2	Ярославль – Высоцк, Ропручей – Тверь (обр.)	мазут	щебень	2777	775	1797	1750	2274	3,58	1,59
Южное направление										
3	Самара – Кавказ, Усть-Донецк – Мурзиха – Самара (обр.)	мазут	щебень	4284	875	2616	1323	2615	4,90	1,64
4	Самара – Кавказ, Усть-Донецк – Мурзиха – Самара (обр.)	мазут	щебень	4284	550	2687	1031	2456	7,78	1,74

Условно-постоянные суточные расходы судна пересчитывались по источнику [7]. Расходы по топливу и смазке главных двигателей, на подогрев высоковязких нефтепродуктов и хозяйственные нужды определялись по методике нормирования топлива и ходового времени, изложенной в [8]. Прочие прямые рейсовые эксплуатационные расходы (оплата прохождения внутренних водных путей и портовых сборов) были найдены по действующим нормативным документам. Значения фрахтовых ставок перевозок грузов в прямом направлении были приняты равными уровню ставок тарифов железнодорожного транспорта на аналогичных перевозках [9], а в обратном – сложившимся на рынке перевозок грузов [10]. В расчётах показателей было принято допущение о том, что расходы, доходы и стоимость судов относятся пропорционально к указанному периоду действия линий по указанным в табл.1 направлениям и не учитываются в рамках всего периода эксплуатации по условиям плавания судов.

Таблица 3

Показатели эффективности судов по направлениям и участкам работы

№	Наименование участка работы	Тип судна	S, руб./т	Ц <sub>сп</sub> , млн.руб	ρ <sub>п</sub> , %	П <sub>в</sub> , тыс.руб.	Э <sub>т</sub> , тыс.руб.	I <sub>ρ</sub> , %	T <sub>ок</sub> , лет	T <sub>ок</sub> <sup>д</sup> , лет	ρ <sub>оэп</sub> , доли ед.	ε <sub>вн</sub> , доли ед.
Северное направление												
1	Ярославль – Высоцк – Питкяранта – Тверь – Ярославль	RST-54	1474	802	29	534887	нет	нет	10,6	-	-	нет
1.1	Ярославль –	RST-	1199	957	35	637712	37712	6	7,04	28,8	0,01	0,11

	Высоцк – Ропручей – Тверь – Ярославль	54								7	3	
2	Ярославль – Высоцк – Ярославль	RST- 54	1856	1206	50	804289	204289	34	5,58	17,7 5	0,29	0,14
3	Ярославль – Высоцк – Ярославль	RST- 27	1715	1603	62	852497	402497	92	4,98	7,22	0,87	0,20
4	Питкяранта – Тверь – Питкяранта	RSD -44	911	53	нет	35554	нет	нет	-	-	-	нет
4.1	Ропручей – Тверь – Ропручей	RSD -44	992	нет	нет	нет	нет	нет	-	-	-	нет
Южное направление												
5	Самара – Кавказ – Усть- Донецк – Мурзиха – Самара	RST- 54	1617	1421	62	115494 8	421615	57	4,75	9,58	0,52	0,16 5
5.1	Самара – Кавказ – Усть- Донецк – Саратов – Самара	RST- 54	1469	1516	67	123214 7	498813	68	4,46	6,19	0,63	0,17 5
6	Самара – Кавказ	RST- 54	2435	1670	76	135749 1	624157	85	4,04	8,04	0,8	0,18 5
7	Самара – Кавказ	RST- 27	2294	2127	87	137255 5	822559	152	3,78	6,8	1,47	0,27
8	Усть-Донецк – Мурзиха	RSD -44	1988	нет	нет	нет	нет	нет	-	-	-	нет
8.1	Усть-Донецк – Саратов	RSD -44	1296	нет	нет	нет	нет	нет	-	-	-	нет

По результатам расчётов, представленным в табл. 3, можно сделать следующие выводы.

Эффективность КС на прямом и обратном грузопотоках значительно ниже (п. 1, 1.1, 5, 5.1), чем при использовании его только на прямом грузопотоке (п. 2, 6). При этом в северном направлении экономический эффект КС отсутствует (п. 1) при наличии прибыли и относительно высокой фрахтовой ставке прямого направления.

Низкая эффективность использования КС объясняется несколькими факторами. Первый и главный фактор – это соотношение фрахтовых ставок прямого и обратного направлений, которые приведены в табл. 2. Как видно из этой таблицы, в северном направлении ставки прямого грузопотока выше обратного более, чем в три раза, а в южном – от трёх до семи раз. Низкие фрахтовые ставки грузопотоков обратных направлений приводят к неэффективному использованию и сухогрузного судна при работе его на линиях типа «вертушка» – по критериям прибыли и по всем показателям оценки инвестиционных проектов (п. 4, 4.1, 8, 8.1).

Ко второй группе факторов относятся: увеличение, по сравнению с танкером, времени грузовой обработки на 2 суток и особенно, обратного пробег – более, чем в 1,6 раза, и расхода топлива на 8% и 23% соответственно по северному и южному направлениям. В совокупности эти факторы ведут к тому, что увеличение расходов и времени рейса не компенсируется увеличением доходов за счет обратной загрузки КС.

Естественно, возникает вопрос об уровне соотношения фрахтовых ставок. С помощью формулы (10) нами были определены ФС обратных грузопотоков при рентабельности капвложений в 5% (см. табл. 2). В этом случае превышение значений ФС прямых грузопотоков составляет только от 20 до 74% (не в разы!). По пересчитанному уровню ФС были проведены дополнительные расчёты показателей эффективности; результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Показатели эффективности с учетом пересчитанных фрахтовых ставок**

№	Наименование участка работы	Тип судна	$\Delta_t$ , тыс.руб	$I_p$ , %	$T_{ок}^н$ , лет	$T_{ок}^д$ , лет	$\rho_{оэп}$ , доли ед.	$e_{вн}$ , доли ед.
Северное направление								
1	Ярославль – Высоцк – Питкяранта – Тверь – Ярославль	RST-54	479319	80	5,24	7,79	0,75	0,19
2	Ярославль – Высоцк – Ярославль	RST-54	204289	34	5,58	12,75	0,29	0,14
3	Ярославль – Высоцк – Ярославль	RST-27	402497	92	4,98	7,22	0,87	0,20
4	Питкяранта – Тверь – Питкяранта	RSD-44	698062	140	3,12	5,25	1,35	0,25
	Эффективность ДК в КС	RST-54	76823	580	4,6	9,1	0,58	0,16
Южное направление								
5.1	Самара – Кавказ – Усть-Донецк – Саратов – Самара	RST-54	723481	99	3,8	6,75	1,05	0,12
6	Самара – Кавказ	RST-54	624157	85	4,0	7,47	0,80	0,22
7	Самара – Кавказ	RST-27	822555	152	3,8	6,77	1,47	0,27
8.1	Усть-Донецк – Саратов	RSD-44	263723	43	5,2	11,27	0,38	0,16

Как видно из табл. 4, в случае пересчёта фрахтовых ставок КС имеет уже бесспорное преимущество в величине прибыли и экономического эффекта не только по сравнению с танкером, но и при использовании КС только в прямом направлении. Но при этом надо учитывать, что уровень фрахтовой ставки обратного грузопотока покрывает затраты на увеличение обратного пробега за счет грузоотправителя, а не СП, что искусственно завышает эффективность КС. При этом необходимо отметить, что использование сухогруза на освоении обратного грузопотока без обратной загрузки тоже становится эффективным.

Для дополнительного анализа и проверки адекватности методических подходов были проведены расчеты показателей эффективности дополнительных капвложений (ДК) в КС по сравнению с танкером и сухогрузом по северному направлению (см. табл. 4). В целом, эти показатели хотя и незначительно, но ниже соответствующих показателей по танкеру и сухогрузу, что также подтверждает предыдущие доводы. По южному направлению ДК не оценивались, так как экономическая эффективность танкера по сравнению с КС выше вследствие относительно высокой фрахтовой ставки.

В целом необходимо отметить, что эффективность использования любых судов начинает проявляться на уровне и выше 34% рентабельности, рассчитанной как отношение валовой прибыли к расходам, что также соотносится с предельной стоимостью судов.

Анализ табл. 3, 4 также указывает на тесную корреляцию всех показателей, как количественных, так и относительных.

### **Заключение**

Описанные выше методы, алгоритмы и показатели для выбора КС весьма просто, на наш взгляд, реализуются с использованием Excel, соблюдают все принципы расчета показателей в соответствии с действующими методическими рекомендациями по оценке эффективности инвестиционных проектов [5], а также обеспечивают комплексный учёт всех основных факторов перевозок грузов, влияющих на их эффективность. Приведенная методика позволяет дополнительно определять и анализировать уровень и зависимость фрахтовых ставок для прямого и обратного грузопотоков, а также эффективность ДК в КС. Исходные данные, принятые для расчёта показателей, с максимально возможным приближением соответствуют условиям эксплуатации судов на реальных грузопотоках и водных путях, что позволяет сделать обобщающие выводы об эффективности КС.

Эффективность использования КС возможна при выполнении ряда отдельных или одновременно действующих условий: равенство (или незначительное превышение) расстояний прямого груженого пробега и суммы расстояний груженого и порожнего обратных пробегов; обеспечение фрахтовыми ставками прямого и обратного грузопотоков задаваемых уровней рентабельности и более высокого уровня эффективности дополнительных вложений в КС по сравнению с танкером и сухогрузом.

Сфера использования КС существенно расширится, если будет использоваться критерий минимума себестоимости перевозок или расходов, который противоречит критериям прибыльности, принятым в настоящее время в рыночных условиях.

Все изложенное выше позволяет сделать важный вывод об адекватности представленных методов оценки и рекомендовать их для практического использования.

### **Благодарности**

Автор выражает благодарность сотрудникам кафедры УТ за помощь в разработке темы, изложенной в статье:

проф., д.т.н. Платову А. Ю. – за нормирование ходового времени и расхода топлива главными двигателями для новых судов с увеличенной полнотой обвода корпуса судна и повышенным гидродинамическим сопротивлением;  
доц., к.т.н. Никулиной М. В. – за научное редактирование статьи.

### **Список литературы**

1. Распоряжение Правительства РФ № 327-р от 29 февраля 2016 г. Стратегия развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года (признано утратившим силу распоряжением Правительства РФ от 27 ноября 2021 года N 3363-р. [Электронный ресурс] – Режим доступа: 11.03.2023 <http://government.ru/docs/22004/>.
2. Распоряжение Правительства РФ от 27 ноября 2021 года N 3363-р Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года. [Электронный ресурс] – Режим доступа: 23.03.2023 <https://docs.cntd.ru/document/727294161>.
3. Гуляев И.А. Оптимизация проектных элементов и характеристик комбинированных судов внутреннего и смешанного (река-море) плавания. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Специальность 2.5.18 – «Проектирование и конструкция судов», Нижний Новгород – 2022. С.24.

4. Никулина М.В., Платов Ю.И. Методика оценки сравнительной эффективности перевозок грузов водным транспортом. // Научные проблемы водного транспорта, № 74 (2023). –С. 184-196. DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi74>.
5. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (вторая редакция): утв. Министерством экономики РФ, Министерством финансов РФ, Государственным комитетом РФ по строительной, архитектурной и жилищной политике 21.06.1999 N VK477. – М.: Экономика, 2000. – С.421.
6. Постановление Правительства РФ от 22 мая 2008 г. N 383 "Об утверждении Правил предоставления субсидий российским организациям на возмещение части затрат на уплату процентов по кредитам, полученным в российских кредитных организациях и в государственной корпорации развития "ВЭБ.РФ" в 2009 - 2023 годах, на уплату лизинговых платежей по договорам лизинга, заключенным в 2009 - 2023 годах с российскими лизинговыми компаниями на приобретение гражданских судов, а также на уплату процентов за предоставление рассрочки по договорам купли-продажи с рассрочкой платежа, заключенным в 2022 году с российскими лизинговыми компаниями на приобретение гражданских судов" (с изменениями и дополнениями) [Электронный ресурс] – Режим доступа: 23.03.2023 URL: <https://base.garant.ru/12160492/>.
7. Карташев А.Б., Сверчков А. В., Щемелинин Л. Г. Экономические аспекты повышения полноты обводов сухогрузных судов смешанного река-море плавания. // Транспорт Российской Федерации. № 2 (75) 2018. – С. 38–45 [Электронный ресурс] – Режим доступа: 23.03.2023 <https://cyberleninka.ru/article/n/ekonomicheskie-aspekty-povysheniya-polnoty-obvodov-suhogruznyh-sudov-smeshannogo-reka-more-plavaniya/viewer>.
8. Платов А.Ю. Методы оперативного планирования работы речного грузового флота в современных условиях: монография / А.Ю. Платов. – Н. Новгород: ФГБОУ ВПО ВГАВТ, 2009. – С.155.
9. Калькулятор расчета ЖД тарифа по России и СНГ. [Электронный ресурс] – Режим доступа: 10.03.2023 URL: <https://ezdok-online.ru/raschet-stoimosti.html>.
10. Стоимость грузоперевозки. [Электронный ресурс] – Режим доступа: 10.03.2023 URL:<https://www.dellin.ru/directions/gruzoperevozki-po-rossii/pitkyaranta-tver/>.

#### References

1. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF № 327-r ot 29 fevralya 2016 g. Strategiya razvitiya vnutrennego vodnogo transporta Rossijskoj Federacii na period do 2030 goda (priznано utrativshim silu rasporyazheniem Pravitel'stva RF ot 27 noyabrya 2021 goda N 3363-r. [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: 11.03.2023 <http://government.ru/docs/22004/>
2. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 27 noyabrya 2021 goda N 3363-r Transportnaya strategiya Rossijskoj Federacii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda. [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: 23.03.2023 <https://docs.cntd.ru/document/727294161>
3. Gulyaev I.A. Optimizaciya proektnyh elementov i harakteristik kombinirovannyh sudov vnutrennego i smeshannogo (reka-more) plavaniya. Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Special'nost' 2.5.18 – «Proektirovanie i konstrukciya sudov», Nizhnij Novgorod – 2022. S.24
4. Nikulina M.V., Platov YU.I. Metodika ocenki sravnitel'noj effektivnosti perevo-zok gruzov vodnym transportom. // Nauchnye problemy vodnogo transporta, № 74 (2023). –С. 184-196. DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi74>
5. Metodicheskie rekomendacii po ocenke effektivnosti investicionnyh proektov (vtoraya redakciya): utv. Ministerstvom ekonomiki RF, Ministerstvom finansov RF, Gosudarstvennym komitetom RF po stroitel'noj, arhitekturnoj i zhilishchnoj politike 21.06.1999 N VK477. – М.: Экономика, 2000. – С.421
6. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 22 maya 2008 g. N 383 "Ob utverzhenii Pravil predostavleniya subsidij rossijskim organizacijam na vozmeshchenie chasti zatrat na uplatu procentov po kreditam, poluchennym v rossijskih kreditnyh organizacijah i v gosudarstvennoj korporacii razvitiya "VEB.RF" v 2009 - 2023 godah, na uplatu lizingovyh platezhej po dogovoram lizinga, zaklyuchennym v 2009 - 2023 godah s rossijskimi lizingovymi kompaniyami na priobretenie grazhdanskih sudov, a takzhe na uplatu procentov za predostavlenie rassrochki po dogovoram kupli-prodazhi s rassrochkoy platezha, zaklyuchennym v 2022 godu s rossijskimi lizingovymi kompaniyami na priobretenie grazhdanskih

- судов" (s izmeneniyami i dopolneniyami) [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: 23.03.2023 URL: <https://base.garant.ru/12160492/>
7. Kartashev A.B., Sverchkov A. V., SHCHemelinin L. G. Ekonomicheskie aspekty povysheniya polnoty obvodov suhogruzhnyh sudov smeshannogo reka-more plavaniya. // Transport Ros-sijskoj Federacii. № 2 (75) 2018. – С. 38–45 [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: 23.03.2023 <https://cyberleninka.ru/article/n/ekonomicheskie-aspekty-povysheniya-polnoty-obvodov-suhogruzhnyh-sudov-smeshannogo-reka-more-plavaniya/viewer>
  8. Platov A.YU. Metody operativnogo planirovaniya raboty rechnogo gruzovogo flota v sovremennyh usloviyah: monografiya / A.YU. Platov. – N. Novgorod: FGBOU VPO VGAVT, 2009. – S.155
  9. Kal'kulyator rascheta ZHD tarifa po Rossii i SNG. [Elektronnyj resurs] – Rezhim do-stupa: 10.03.2023 URL: <https://ezdok-online.ru/raschet-stoimosti.html>
  10. Stoimost' gruzoperevozki. [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: 10.03.2023 URL: <https://www.dellin.ru/directions/gruzoperevozki-po-rossii/pitkyaranta-tver/>

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

<b>Платов Юрий Иванович</b> , д.т.н., профессор, профессор кафедры управления транспортом, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: <a href="mailto:platov_ji@mail.ru">platov_ji@mail.ru</a>	<b>Juri I. Platov</b> , Dr. Sci. (Eng), professor of Transport Management Chair, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603950, e-mail: <a href="mailto:platov_ji@mail.ru">platov_ji@mail.ru</a>
--	---

Статья поступила в редакцию 27.03.2023; опубликована онлайн 20.06.2023.  
Received 27.03.2023; published online 20.06.2023.

**ВОДНЫЕ ПУТИ, ПОРТЫ И ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ  
СООРУЖЕНИЯ**

**WATERWAYS, PORTS, AND HYDRAULIC ENGINEERING  
CONSTRUCTIONS**

УДК 556.5

DOI: 10.37890/jwt.vi75.378

**Натурные исследование уровня режима р. Волга в  
нижнем бьефе Нижегородской ГЭС**

**М.А. Матюгин**

*ORCID: 0000-0002-9446-0352*

**Д.А. Мильцын**

*ORCID: 0000-0001-6937-7779*

**М.А. Решетников**

*ORCID: 0000-0002-8492-0052*

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

**Аннотация.** В летний период 2021 года на участке р. Волга в нижнем бьефе Нижегородской ГЭС были проведены натурные исследования уровня режима. Для этого на всем протяжении участка было обустроено шесть временных водомерных постов, по которым в течение светового дня проводились измерения уровня воды. По результатам исследования получены основные характеристики волны попуска, образующейся при суточном регулировании стока на Нижегородской ГЭС, в том числе амплитуда волны, периоды подъема и спада уровня воды в различных створах участка, изменения уклона водной поверхности в течение дня. На основании полученных данных сделаны выводы о возможности их применения при диспетчерском регулировании движения флота на участке и выполнении проектных и научных работ.

**Ключевые слова:** гидрологический режим реки, уровень воды, нижний бьеф гидроузла, гидрометрия, суточные колебания уровня воды.

**Full-scale study of the Volga river level regime in the lower  
reaches of Nizhny Novgorod HPS**

**Michail A. Matugin**

*ORCID: 0000-0002-9446-0352*

**Dmitry A. Miltsin**

*ORCID: 0000-0001-6937-7779*

**Maxim A. Reshetnikov**

*ORCID: 0000-0002-8492-0052*

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

**Abstract.** In the summer of 2021, full-scale studies of the river level regime on the Volga River section in the lower reaches of Nizhny Novgorod hydroelectric power station were carried out. For this purpose, six temporary water measuring posts were equipped throughout the whole site, according to which water levels were measured during daylight hours. According to the study results, the main characteristics of the release wave formed during the daily regulation of the runoff at Nizhny Novgorod HPS were obtained, including the wave amplitude, periods of water level rise and fall in various sections of the site, changes in water surface slope during the day. Based on the data obtained, conclusions about the possibility of

their application in the fleet movement dispatching regulation at the site and execution of design and scientific works have been drawn.

**Keywords:** hydrological river regime, water level, waterworks lower reach, hydrometry, daily water level fluctuations.

### **Введение**

Внутренний водный транспорт является важной частью общей транспортной инфраструктуры Российской Федерации и наряду с другими видами транспорта обеспечивает эффективное функционирование всех отраслей экономики нашей страны. В европейской части России наиболее востребованные внутренние водные пути сосредоточены в Единой глубоководной системе (ЕГС), имеющей выход к пяти морям и объединяющей все основные крупные реки региона.

Развитие грузоперевозок по ЕГС в последние десятилетия несколько ограничивается целым рядом факторов [1, 2, 3, 4] среди которых одним из определяющих является низкая пропускная способность участка р. Волга от г. Городец до г. Нижний Новгород, связанная с нехваткой судоходных глубин в меженный период. Чебоксарское водохранилище после ввода в эксплуатацию по ряду причин не было наполнено до проектной 68,0 отметки, что привело к отсутствию подпора на верхнем участке водохранилища. Помимо этого, участок р. Волга от г. Городец до г. Нижний Новгород расположен в нижнем бьефе Нижегородской ГЭС, находящейся в эксплуатации уже более 60 лет. Таким образом, на гидрологический режим рассматриваемого участка оказывают влияние сразу несколько антропогенных факторов: суточное регулирование стока на Нижегородской ГЭС, отсутствие подпора со стороны нижележащего гидроузла, посадки уровня воды в связи с длительным периодом эксплуатации Нижегородской ГЭС, значительные объемы ежегодных дноуглубительных и добычных работ на участке [5].

Традиционно вопросы исследования гидрологического режима на данном участке реки решались с помощью классических расчетных научных методов или с использованием более современного математического моделирования [6]. При этом полученные результаты зачастую не были полностью верифицированы в связи с отсутствием натуральных фактических данных и их апробация основывалась на отдельных гидрологических параметрах, полученных в ходе исследований в 1980-1990 годы.

В связи с этим актуальным является вопрос проведения натуральных исследований фактического гидрологического режима реки Волга в нижнем бьефе Нижегородской ГЭС, в том числе с использованием современного оборудования и методов [7].

### **Методика проведения исследований**

В рамках проведения натуральных исследований летом 2021 года на участке нижнего бьефа Нижегородского гидроузла от створа плотины до г. Нижний Новгород были обустроены шесть временных гидрологических постов. Каждый пост представлял собой алюминиевую телескопическую нивелирную рейку длиной три метра, закрепленную в прибрежной части водоема на расстоянии порядка 3-5 метров от берега за предварительно устроенную сваю из металлического уголка. Схема расположения постов представлена на рисунке 1.



Рис.1. Схема расположения гидрологических постов

Пять постов были расположены на правом берегу реки и один пост («СНТ Елена») расположен на левом берегу. Местоположения гидрологических постов выбирались на прямолинейных участках реки, вне затонных частей и выходов сбросных коллекторов в водоем, а также исходя из возможности беспрепятственного доступа к береговой полосе, в том числе на автотранспорте. Ближайший пост к Нижегородской ГЭС (г/п «Заволжье») располагался на расстоянии порядка 2 км от створа плотины, наиболее удаленный пост (г/п «Нижний Новгород») – на расстоянии 57 км от створа гидроузла.

Привязка условного уровня воды по нивелирной рейке на гидропосте к абсолютному уровню высот Балтийской системы была произведена методами спутниковой геодезии. В частности, приемником EFT M3 были определены отметки нулей рек относительно геоида EGM-08 с использованием метода Real-time kinematic (RTK). Определения отметок выполнялись в течении тридцати эпох с осреднением результатов по времени. По результатам измерений максимальная среднеквадратическая ошибка определения высотной отметки составила порядка 5 мм для г/п «Заволжье» и «СНТ Елена», для остальных постов менее 5 мм.

Для дополнительного контроля получаемых отметок были выполнены наблюдения на ближайших пунктах государственной геодезической сети, которые показали максимальную высотную невязку решения не более 3,5 см. Таким образом, итоговая точность определения отметок нулей рек временных водомерных постов составила не более 4 см относительно пунктов ГГС.

Измерения уровней воды в условных отметках по нивелирной рейке проводились наблюдателями на каждом из временных постов 30 июня 2021 года в период с 7:00 до 20:00 с дискретностью в пять минут. Данные по уровням заносились в

предварительно подготовленные бланки по схеме «время – условный уровень воды». По каждому из постов при такой схеме было получено порядка 155 значений.

Общие сведения по временным гидрологическим постам представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сведения по временным гидрологическим постам

№ п/п	Название поста	Расположение поста, км		Абсолютная отметка нуля гидропоста, м БС
		судовой ход	от створа ГЭС	
1	Заволжье	852	2	66,26
2	СНТ Елена	862	12	65,59
3	Балахна	875	25	65,07
4	Малое Козино	881	31	64,72
5	Хальзовская	897	47	62,82
6	Нижний Новгород	907	57	62,13

**Результаты натурных исследований**

По результатам проведенных измерений были получены графики колебания уровня воды по шести временным гидропостам на участке нижнего бьефа Нижегородской ГЭС на 30.06.2021 г. (рис.2).

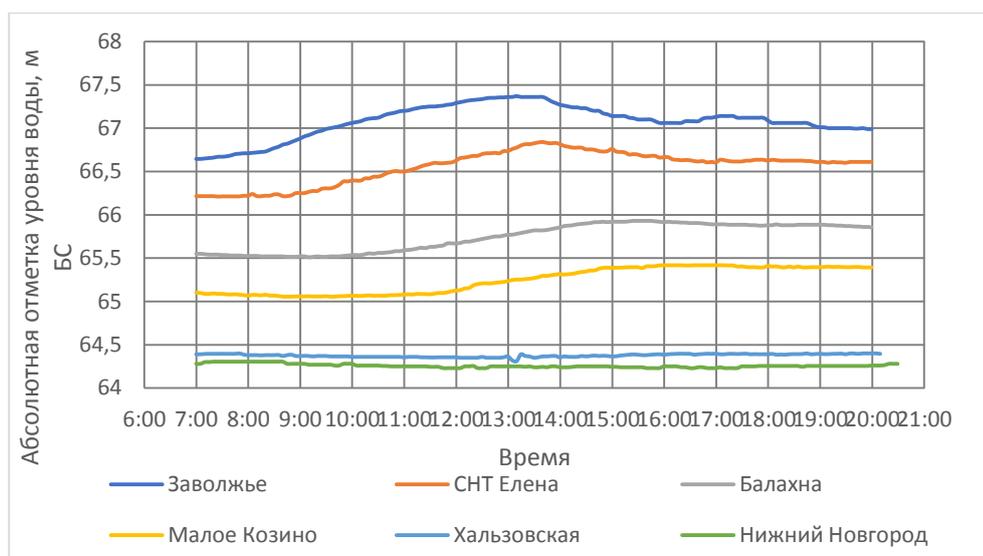


Рис.2. Графики колебания уровней воды по временным гидрологическим постам в абсолютных отметках Балтийской системы высот

По полученным зависимостям видно, что наибольшие колебания уровня в течение дня происходят на участке «Заволжье – Малое Козино», который включает четыре верхних гидропоста. По двум нижним гидропостам суточные колебания уровня практически отсутствуют. Для более детального анализа колебаний уровня по различным участкам нижнего бьефа измеренные величины уровней воды были приведены к единому условному уровню «+100 см» на 7:00 утра (рис.3).

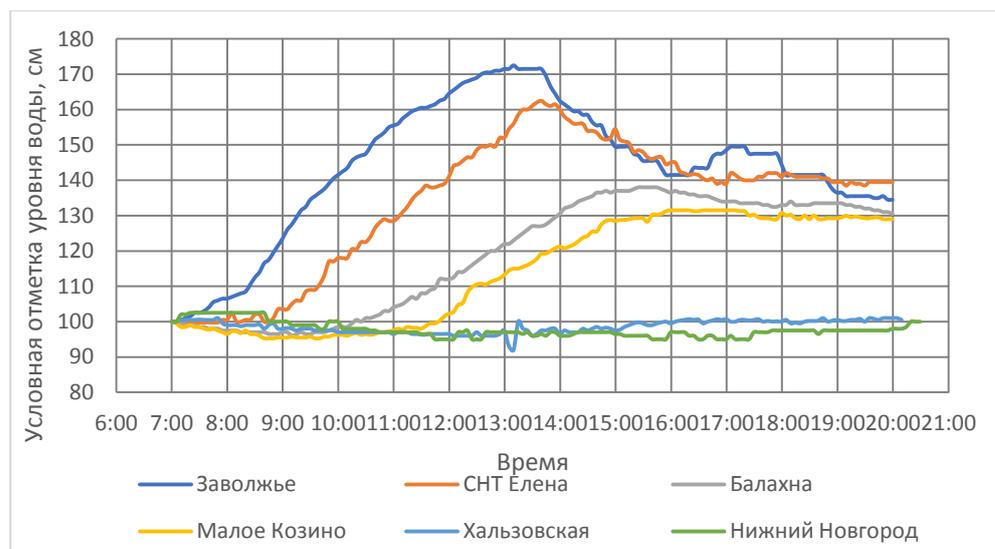


Рис.3. Графики колебания уровней воды по временным гидрологическим постам в условных отметках

По графику на рис.3 явно прослеживается формирование волны попуска, связанной с суточным регулированием стока при работе Нижегородской ГЭС. С семи утра начинается повышенный сброс воды через турбины гидроагрегатов для покрытия утреннего пика потребления электроэнергии и уровень воды начинает планомерно расти в течение шести часов. Амплитуда роста при этом составляет порядка 70 см. Далее по времени происходит небольшой спад уровня, связанный с уменьшением сброса, и повторный подъем в период 17-18 часов, обусловленный покрытием вечернего пика потребления. Амплитуда второго пика незначительна и составляет не более 10 см.

По данным начала утреннего подъема уровня по нижележащим гидропостам скорость движения волны попуска вниз по течению составляет порядка 5,5-6 км/ч. По мере движения вниз волна попуска теряет свою высоту и практически полностью исчезает на расстоянии около 40 км от створа гидроузла (рис.4).

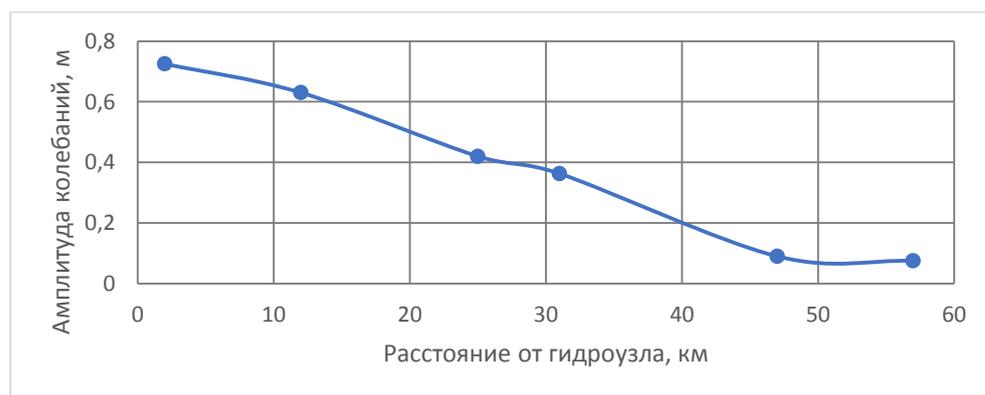


Рис. 4. Амплитуда суточных колебаний уровня воды (30.06.2021 г.)

### Анализ полученных результатов

Гидрологический режим нижнего бьефа Нижегородской ГЭС согласно проведенным натурным исследованиям в меженьный период (30.06.2021 г.) в значительной мере определяется суточным режимом регулирования стока. С началом утреннего повышения сброса воды и подъемом уровня формируется волна попуска. Постоянный подъем уровня воды продолжается на протяжении 5-6 часов, после которого с небольшим снижением уровень поддерживается на повышенных отметках до вечера (20:00). В ночное время со снижением выработки электроэнергии и сброса воды происходит снижение уровня до исходного на 7:00. В настоящее время период повышенного уровня волны за счет волны попуска активно используется крупнотоннажным флотом для прохождения мелководного участка «Нижегородская ГЭС – Нижний Новгород». По полученным данным дневные уровни воды в районе Малого Козино и Балахны превышают утренние на 30-40 см, выше по течению на 40-50 см, в отдельные пики в районе Городца и Заволжья до 70 см. При этом экстремальные значения повышения поддерживаются не более 2-2,5 часов и постепенно снижаются до средних значений, не превышающих 40 см.

Вечерний повышенный сброс уровня воды в районе 17-18 часов практически не формирует сосредоточенную волну в нижнем бьефе и просматривается только на графиках колебания по г/п «Заволжье» в 2 км ниже плотины. Однако, благодаря ему, сохраняется несколько повышенный уровень воды в нижнем бьефе в вечернее время.

По мере прохождения вниз по течению волна попуска постепенно затухает и, согласно данным измерений на 30.06.2021 г., полностью исчезает на расстоянии около 40 км от створа плотины. Измеренные уровни воды по гидропостам в черте г. Нижний Новгород (г/п «Хальзовская» и «Нижний Новгород») не зафиксировали фактических колебаний, связанных с неравномерным стоком ГЭС. Такие параметры волны попуска, как высота и скорость движения, также постепенно затухают по мере удаления от плотины гидроузла.

В связи с постоянным изменением уровня воды по всему участку нижнего бьефа Нижегородской ГЭС в течение дня происходят значительные колебания уклона водной поверхности (рис.5).

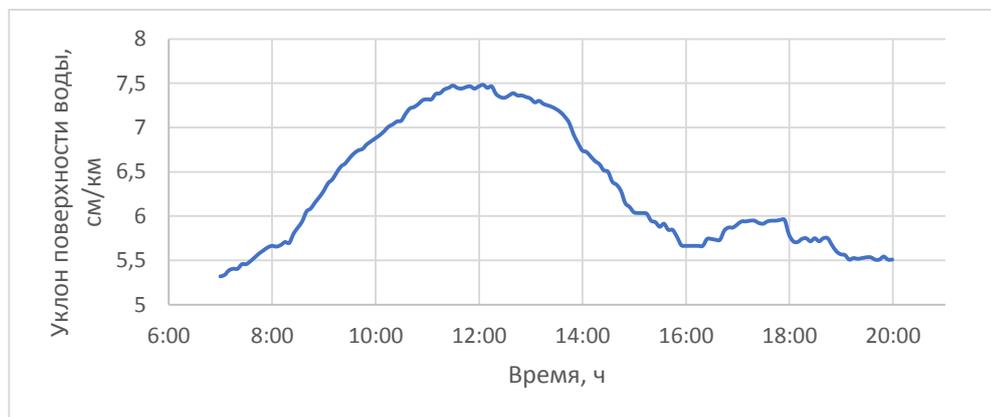


Рис.5. Изменения уклона водной поверхности на участке «Заволжье – Малое Козино» (30.06.2021 г.)

На участке нижнего бьефа «Заволжье – Малое Козино» уклон в течение дня изменяется практически в 1,5 раза от 5,5 до 7,5 см/км. При этом изменения уклона происходят постоянно в течение дня, что приводит к интенсификации русловых

переформирований на данном участке реки и суточным изменениям скоростного режима течения.

### **Выводы и рекомендации**

Полученные в результате проведения натурных исследований нижнего бьефа Нижегородской ГЭС данные дают широкий спектр гидрологической информации участка реки в части урванного режима, уклонов свободной поверхности воды, а также основных характеристик волны попуска, возникающей при работе гидроузла. Все эти данные могут быть использованы как при диспетчерском регулировании движения крупнотоннажного флота на затруднительном участке «Городец – Нижний Новгород» для поиска наиболее оптимальных временных окон с повышенными глубинами, так и при проектировании и эксплуатации гидротехнических сооружений, расположенных на рассматриваемом участке реки, планировании и проведении дноуглубительных работ в русле реки [8, 9], анализе русловых переформирований участка [10, 11].

Следует отметить, что исследования проводились в меженьный период в будний день и отражают типовой гидрологический режим участка только для этого периода водности года. Работа гидроагрегатов в режиме суточного регулирования также зависит от потребности в выработке электроэнергии в разные дни недели и несколько отличается в рабочие и выходные дни. В связи с этим представляет интерес продолжение натурных исследований на участке с выполнением их в различные периоды водности: половодье, паводок, зимняя межень, а также в различные дни недели: отдельно в выходные и рабочие дни. Это позволит получить более полный объем данных по фактическому гидрологическому режиму реки в нижнем бьефе Нижегородской ГЭС под воздействием постоянной антропогенной нагрузки.

### **Список литературы**

1. Дрейбанд Д.В., Коршунов Д.А., Ничипорук А.О. Проблемы развития инфраструктуры внутреннего водного транспорта с учётом стратегических задач.//Транспорт. Горизонты развития. 2022: Материалы международного научно-практического форума. ФГБОУ ВО «ВГУВТ». – 2022. – URL: [http://вф-река-море.рф/2022/1\\_10.pdf](http://вф-река-море.рф/2022/1_10.pdf)
2. Минеев, В. И., Почкаева, О. В., & Иванов, В. М. (2022). Проблемы эффективного функционирования Единой глубоководной системы европейской части России. Научные проблемы водного транспорта, (71), 122-132. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi71.253>
3. Железнов, С. В., Липатов, И. В., Лисин, А. А., & Уртминцев, Ю. Н. (2021). Исследование факторов восстановления грузовых речных перевозок на Единой глубоководной системе России. Научные проблемы водного транспорта, (69), 197-208. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi69.227>
4. Костров В.Н., Глотова И.В. Анализ перспектив устойчивого функционирования волжского бассейна в условиях интеграции в международную транспортную систему.//Транспорт. Горизонты развития. 2021: Материалы международного научно-практического форума. ФГБОУ ВО «ВГУВТ». – 2021. – URL: [http://вф-река-море.рф/2021/1\\_7.pdf](http://вф-река-море.рф/2021/1_7.pdf)
5. Ситнов А.Н., Воронина Ю.Е. Оценка гидравлического режима нижнего бьефа Нижегородской ГЭС при строительстве низконапорного гидроузла и в других альтернативных вариантах решения судоходной проблемы//Труды 4-й всероссийской научной конференции «Проблемы экологии Волжского бассейна» («ВОЛГА-2019»). Выпуск 2.- г. Н.Новгород: изд. ФГБОУ ВО «ВГУВТ». – 2019, URL: [http://вф-река-море.рф/ECO/2019/PDF\\_ECO/eco24.pdf](http://вф-река-море.рф/ECO/2019/PDF_ECO/eco24.pdf)
6. Ситнов А.Н., Воронина Ю.Е. Оценка динамики свободной поверхности и глубин в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла при возведении третьей нитки шлюзов или их третьей ступени // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. Выпуск 61. – Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2019. – 28-40 с.

7. Матюгин М.А., Мильцын Д.А., Решетников М.А. Перспектива исследования уровня режима р. Волга на участке от Нижегородской ГЭС до г. Нижний Новгород//Труды 6-й всероссийской научной конференции «Проблемы экологии Волжского бассейна» («ВОЛГА-2021»). Выпуск 4.- г. Н.Новгород: изд. ФГБОУ ВО «ВГУВТ». – 2021, URL: [http://vf-река-море.рф/ECO/2021/PDF\\_ECO/eco20.pdf](http://vf-река-море.рф/ECO/2021/PDF_ECO/eco20.pdf)
8. Шестова, М. В., & Добрынина, А. В. (2022). Исследование современного состояния нижнего бьефа Нижегородской ГЭС с учетом русловых деформаций и влияния дноуглубительных работ. *Научные проблемы водного транспорта*, (73), 255-265. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi73.323>
9. Шестова М.В., Решетников М.А. Результаты гидравлических расчетов по оценке влияния капитального дноуглубления при канализировании русла на посадку уровня воды на порогах Городецких шлюзов.//Транспорт. Горизонты развития. 2022: Материалы международного научно-практического форума. ФГБОУ ВО «ВГУВТ». – 2022. – URL: [http://vf-река-море.рф/2022/6\\_22.pdf](http://vf-река-море.рф/2022/6_22.pdf)
10. Воронина, Ю. Е. (2022). Методические подходы оценки заносимости перекатов нижнего бьефа Нижегородской ГЭС и их влияние на обеспечение судоходных глубин участка. *Научные проблемы водного транспорта*, (72), 198-207. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi72.294>
11. Воронина Ю.Е., Шестова М.В. Анализ заносимости перекатов нижнего бьефа Нижегородской ГЭС при проведении дноуглубительных работ и их учет в обеспечении судоходных глубин.//Транспорт. Горизонты развития. 2022: Материалы международного научно-практического форума. ФГБОУ ВО «ВГУВТ». – 2022. – URL: [http://vf-река-море.рф/2022/6\\_7.pdf](http://vf-река-море.рф/2022/6_7.pdf)

#### References

1. Dreiband D.V., Korshunov D.A., Nichiporuk A.O. Problemi razvitiya infrastrukturi vnutrennego vodnogo transporta s uchetom strategicheskikh zadach [Problems of development of inland water transport infrastructure taking into account strategic objectives] // *Transport. Gorizonti razvitiya* [Transport. Development horizons]. 2022: – URL: [http://vf-река-море.рф/2022/1\\_10.pdf](http://vf-река-море.рф/2022/1_10.pdf)
2. Mineev, V. I., Pochekaeva, O. V., & Ivanov, V. M. (2022). Problemi effektivnogo funkcionirovaniya Edinoi glubokovodnoi sistemi evropeiskoi chasti Rossii [Problems of effective functioning of the Unified Deep-water System of the European part of Russia]. *Nauchnie problemi vodnogo transporta* [Scientific problems of water transport], (71), 122-132. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi71.253>
3. Zeleznov, S. V., Lipatov, I. V., Lisin, A. A., & Urtmineev, Y. N. (2021). Issledovanie faktorov vosstanovleniya gruzovih rechnik perevozok na Edinoi glubokovodnoi sisteme Rossii [Investigation of factors of restoration of cargo river transportation on the Unified Deep-water System of Russia]. *Nauchnie problemi vodnogo transporta* [Scientific problems of water transport], (69), 197-208. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi69.227>
4. Kostrov V.N., Glotova I.V. Analiz perspektiv ustoychivogo funkcionirovaniya volgskogo basseina v usloviyah integracii v megdunarodnuy transportnuy sistemu [Analysis of the prospects for the sustainable functioning of the Volga basin in terms of integration into the international transport system] // *Transport. Gorizonti razvitiya* [Transport. Development horizons] 2021. – URL: [http://vf-река-море.рф/2021/1\\_7.pdf](http://vf-река-море.рф/2021/1_7.pdf)
5. Sitnov A.N., Voronina Y.E. Ocenka gidravlicheskogo regima nignego biefa Nigeorodskoi GES pri stroitelstve nizkonapornogo gidrouzla i v drugih alternativnih variantah reshenia sudohodnoi problem [Assessment of the hydraulic regime of the lower reaches of the Nizhny Novgorod hydroelectric power station during the construction of a low-pressure hydroelectric unit and in other alternative solutions to the shipping problem] // «Problemi ekologii Volgskogo basseina» [Problems of ecology of the Volga basin] («Volga-2019»). 2019, URL: [http://vf-река-море.рф/ECO/2019/PDF\\_ECO/eco24.pdf](http://vf-река-море.рф/ECO/2019/PDF_ECO/eco24.pdf)
6. Sitnov A.N., Voronina Y.E. Ocenka dinamiki svobodnoi poverhnosti i glubin v nignem biefe Nigeorodskogo gidrouzla pri vozvedenii tretiei nitki shlyuzov ili ih trtiei stupeni [Assessment of the dynamics of the free surface and depths in the lower reaches of the Nizhny Novgorod hydroelectric complex during the construction of the third line of locks or their third stage] // *Vestnik Volzhskoj gosudarstvennoj akademii vodnogo transporta*. №61, 2019. 28-40.

7. Matyugin M.A., Miltsin D.A., Reshetnikov M.A. Perspektiva issledovaniya urovennogo rezhima r. Volga na uchastke ot Nizhegorodskoj GES do g. Nizhnij Novgorod // «Problemi ekologii Volgskogo basseina» [Problems of ecology of the Volga basin] («Volga-2021»). 2021, URL: [http://вф-река-море.рф/ECO/2021/PDF\\_ECO/eco20.pdf](http://вф-река-море.рф/ECO/2021/PDF_ECO/eco20.pdf)
8. Shestova, M. V., & Dobrynina, A. V. (2022). Issledovanie sovremennogo sostoyaniya nizhnego b'efa Nizhegorodskoj GES s uchetom ruslovyh deformatsij i vliyaniya dnouglubitel'nyh rabot [Investigation of the current state of the lower reaches of the Nizhny Novgorod Hydroelectric power station, taking into account channel deformations and the influence of dredging]. Nauchnie problemi vodnogo transporta [Scientific problems of water transport], (73), 255-265. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi73.323>
9. Shestova M.V., Reshetnikov M.A. Rezul'taty gidravlicheskih raschetov po ocenke vliyaniya kapital'nogo dnouglubleniya pri kanalizirovanii rusla na posadku urovnya vody na porogah Gorodeckih shlyuzov [The results of hydraulic calculations to assess the impact of capital dredging during channel channeling on the landing of the water level on the thresholds of Gorodetsky locks]. // Transport. Gorizonti razvitiya [Transport. Development horizons]. 2022: – URL: [http://вф-река-море.рф/2022/6\\_22.pdf](http://вф-река-море.рф/2022/6_22.pdf)
10. Voronina, Y. E. (2022). Metodicheskie podhody ocenki zanosimosti perekatov nizhnego b'efa Nizhegorodskoj GES i ih vliyanie na obespechenie sudohodnyh glubin uchastka [Methodological approaches for assessing the carrying capacity of the lower reaches of the Nizhny Novgorod Hydroelectric power station and their impact on ensuring navigable depths of the site]. Nauchnie problemi vodnogo transporta [Scientific problems of water transport], (72), 198-207. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi72.294>
11. Voronina, Y. E. (2022). Metodicheskie podhody ocenki zanosimosti perekatov nizhnego b'efa Nizhegorodskoj GES i ih vliyanie na obespechenie sudohodnyh glubin uchastka [Analysis of the drift of the lower reaches of the Nizhny Novgorod Hydroelectric power station during dredging and their accounting in ensuring navigable depths]. // Transport. Gorizonti razvitiya [Transport. Development horizons]. – 2022. – URL: [http://вф-река-море.рф/2022/6\\_7.pdf](http://вф-река-море.рф/2022/6_7.pdf)

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Матюгин Михаил Александрович**, к.т.н., доцент, доцент кафедры водных путей и гидротехнических сооружений, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: [mihailmatyugin@mail.ru](mailto:mihailmatyugin@mail.ru)

**Мильцын Дмитрий Алексеевич**, к.т.н., доцент кафедры водных путей и гидротехнических сооружений, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: [miltsinda@mail.ru](mailto:miltsinda@mail.ru)

**Решетников Максим Алексеевич**, к.т.н., старший преподаватель кафедры водных путей и гидротехнических сооружений, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: [serfskiwind@gmail.com](mailto:serfskiwind@gmail.com)

**Michail A. Matugin**, Ph.D (Eng), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Waterway and Hydraulic Structures, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterova street, Nizhny Novgorod, Russia, 603951

**Dmitry A. Miltsin**, Ph.D (Eng), Associate Professor of the Department of Waterway and Hydraulic Structures, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterova street, Nizhny Novgorod, Russia, 603951

**Maxim A. Reshetnikov**, Ph.D (Eng), Senior lecturer of the Department of Waterway and Hydraulic Structures, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterova street, Nizhny Novgorod, Russia, 603951

Статья поступила в редакцию 24.04.2023; опубликована онлайн 20.06.2023.  
Received 24.04.2023; published online 20.06.2023.

## **ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

### **ENVIRONMENTAL SAFETY**

УДК 504.45.054: 665.6

DOI: 10.37890/jwt.vi75.379

#### **Прогнозирование разливов нефти с судов в Оленекском заливе**

**А.Е. Пластинин**

*ORCID: 0000-0003-4244-8703*

**А.Н. Каленков**

*ORCID: 0000-0001-8985-5598*

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

**Аннотация.** В связи с необходимостью разработки и совершенствования мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти в Ленском бассейне внутренних водных путей в статье выполнено прогнозирование распространения нефтяного загрязнения по водной поверхности в Оленекском заливе моря Лаптевых. Целью данного исследования является оценка параметров разлива нефти и нефтепродуктов и создание ситуационных математических моделей, необходимых для расчета средств борьбы с разливами нефти (боновых заграждений и нефтесборщиков). Построены зависимости для оценки длины и ширины нефтяных пятен при разливах в Оленекском заливе моря Лаптевых. Полученные результаты применены при создании регионального (бассейнового) плана по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов в Ленском бассейне.

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, воздействие на окружающую среду, разливы нефти, прогнозирование, Ленский бассейн, Оленекский залив, море Лаптевых.

#### **Forecasting oil spills from ships in Oleneksky Bay**

**Andrey E. Plastinin**

*ORCID: 0000-0003-4244-8703*

**Aleksandr N. Kalenkov**

*ORCID: 0000-0001-8985-5598*

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

**Abstract.** In connection with the need to develop and improve measures to prevent and eliminate oil spills in the Lena Basin of inland waterways, the article predicts the spread of oil pollution over the water surface in the Olenek Bay of the Laptev Sea. The purpose of this study is to evaluate the parameters of oil and oil products spills and create situational mathematical models necessary for the calculation of control means (booms and oil skimmers). Relationships were constructed to estimate the length and width of oil slicks during spills in the Oleneksky Bay of the Laptev Sea. The results obtained were applied in the development of a regional (basin) plan for the prevention and response to oil and oil product spills in the Lena Basin.

**Keywords:** environmental safety, environmental impact, oil spills, forecasting, Lena Basin, Olenek Bay, Laptev Sea.

## **Введение**

Прогнозирование разливов нефти основано на применении методов математического моделирования, воспроизводящих внутренние и внешние процессы нефтяного загрязнения [1 – 3]. При моделировании движения нефтяного разлива важно учитывать процесс диффузии, включая вихревую диффузию поверхностных вод. На основе исследований с красителем, Эллиот и Херфорд (1989) пришли к выводу, что такой процесс не является фиктивным и что параметр диффузии, зависящий от времени, лучше отражает эмпирические результаты (Lehr et al. 2002) [4]. Дрейф нефти из-за адвекции в основном происходит из-за ветра и течения. Предполагая, что размещение нефти на границе раздела воздух-вода не изменит напряжения сдвига, Холт (1972) предложил, что скорость перемещения нефти, обусловленная ветром, составляет примерно 3% от скорости ветра. Дрейф, вызванный приливным течением, был просто принят за скорость приливного течения. Когда присутствуют как ветровое течение, так и приливные течения, он предложил просто сложить две векторные величины (Солтанпур и др., 2013). Если нефтяное пятно находится близко к берегу, а скорость ветра составляет меньше 10 км/ч, пятно обычно движется со скоростью, равной 100 % от поверхностного течения и примерно 3% от скорости ветра. Однако если скорость ветра превышает 20 км/ч, а пятно находится в открытом море, ветер преобладает при определении движения пятна (Фингас 2015) [4].

Вероятно, наиболее важной причиной долгосрочного распространения нефти является воздействие ветра на водную поверхность. Наблюдения за прошлыми разливами привели к эмпирическому правилу, согласно которому нефтяное пятно движется примерно со скоростью три процента от скорости ветра, измеренной на высоте десяти метров над поверхностью воды. Примерно две трети этого движения представляют собой дрейф поверхностных волн. Оставшаяся часть представляет собой движение пятна по поверхности воды (Lehr et al. 2002) [4].

Литературный обзор показал отсутствие исследований, посвященных прогнозированию разливов нефти с судов в Оленекском заливе, за исключением работы [5], где выполнена оценка рисков возникновения и последствий разливов нефти на Северном морском пути в бассейне моря Лаптевых, однако, вопросы оценки длины и ширины нефтяных пятен, необходимых для расчета боновых заграждений, остались за рамками вышеуказанной работы и представляются актуальными.

Цель этого исследования состоит в том, чтобы обеспечить оперативные прогнозы траектории и статистики по разливу в случае реального инцидента с разливом нефти и тем самым помочь определить приоритеты мероприятий по ликвидации разливов нефти в Оленекском заливе моря Лаптевых. Данное исследование также направлено на проведение оценки рисков для важных ресурсов (побережья, рыболовства, морской дикой природы, морских парков и других охраняемых прибрежных районов) в пострадавшем регионе, а также на оказание помощи в разработке берегового планирования и управления [4 – 6].

## **Материалы и методы**

В этом исследовании для моделирования процесса распространения нефти использовалось программное средство PISCES 2, которое обеспечивает анализ циркуляции водной среды и оперативное моделирование. Встроенная модель предсказывает траектории прошлых и прогнозных разливов нефти, она успешно использовалась для моделирования распространения загрязнения на водной поверхности [4].

В качестве модельного района в этом исследовании был выбран Оленекский залив моря Лаптевых – одного из морей Северного Ледовитого океана, расположенного между Карским и Восточно-Сибирским морями [7]. Растительный

покров на побережье моря Лаптевых однообразен. Этот район окружен побережьями, которые имеют разный уровень экологической чувствительности, тундра подходит вплотную к береговой линии. На южном берегу залива в защищенных от ветра районах, например, вблизи устья реки Оленек и на берегах вершин губ Буор-Хая и Селляхская, встречаются отдельные участки с довольно густым травяным покровом [7]. Оленекский залив является местом обитания более 30 видов рыб. На береговых линиях Оленекского залива обитают мигрирующие береговые и наземные птицы. В этом районе наблюдается большое разнообразие местных экосистем и видов, которые довольно уязвимы в случае разлива нефти [4].

Все полученные данные подвергались статистической обработке методами вариационной статистики. Анализ проводился с помощью математической системы STATISTICA 8.

### Результаты и обсуждение

В работе выполнено моделирование разлива дизельного топлива массой 1200 т с дислокацией источника в Оленекском заливе моря Лаптевых в количестве 8 сценариев соответственно для 8 направлений ветра силой 4 м/с. Скорость поверхностного течения 0,02 м/с (генеральное направление 90 и 342 градусов), скорость приливного течения до 0,47м/с (направление 172 градусов) [7 – 9].

Для оценки нефтяного загрязнения проводилось математическое моделирование следующих показателей: длина и ширина нефтяного пятна, а также длина загрязненного берега.

Оценки параметров нефтяного загрязнения в Оленекском заливе моря Лаптевых для северного направления ветра представлены в качестве примера в табл. 1– 3 и на рис. 1 – 3.

Таблица 1

**Оценки параметров нефтяного загрязнения в Оленекском заливе моря Лаптевых для северного направления ветра**

№	Свойства разлива	1 час	2 часа	6 часов	12 часов	36 часов	48 часов
1	Дислокация пятна, шир. долг.	73°.02. 507N 121°23. 502E	73°.01. 743N 121°21. 247E	73°.01. 315N 121°20. 016E	73°.00. 229N 121°25. 476E	72°.56. 186N 121°18. 496E	72°.56.003 N 121°15.798 E
2	Длина пятна, м	458	566	703	811	9600	4200
3	Ширина пятна, м	469	519	680	825	83,9	63
4	Длина загрязненной части берега, м	0	0	0	0	13466	15529

Таблица 2

**Оценки параметров нефтяного загрязнения в Оленекском заливе моря Лаптевых для различных направлений ветра на 4 часа с момента разлива**

Направление ветра/Свойства разлива	0	45	90	135	180	225	270	315	360
Дислокация пятна, шир. долг	73°.01. 182N 121°19. 068E	73°.01. 514N 121°16. 663E	73°.02. 324N 121°15. 688E	73°.03. 048N 121°17. 635E	73°.03. 615N 121°19. 543E	73°.03. 227N 121°22. 547E	73°.02. 237N 121°22. 735E	73°.01. 493N 121°21. 597E	73°.01. 182N 121°19. 068E
Длина пятна, м	671	668	674	607	604	621	646	673	671
Ширина пятна, м	607	594	588	600	602	616	612	605	607

Таблица 3

**Оценки параметров нефтяного загрязнения в Оленекском заливе моря Лаптевых для различных направлений ветра на 24 часа с момента разлива**

Направление ветра/Свойства разлива	0	45	90	135	180	225	270	315	360
Дислокация пятна, шир. долг	72°.56. 819N 121°22. 220E	72°.58. 083N 121°07. 844E	73°.02. 856N 121°04. 039E	73°.06. 874N 121°11. 647E	73°.08. 515N 121°25. 740E	73°.06. 977N 121°40. 512E	73°.03. 355N 121°47. 770E	73°.03. 355N 121°47. 770E	72°.56. 819N 121°22. 220E
Длина пятна, м	3600	1600	1100	988	1200	1100	1200	1800	3600
Ширина пятна, м	880	954	1100	946	961	1200	622	556	880
Длина загрязненной части берега, м	6430	0	0	0	0	0	0	0	6430

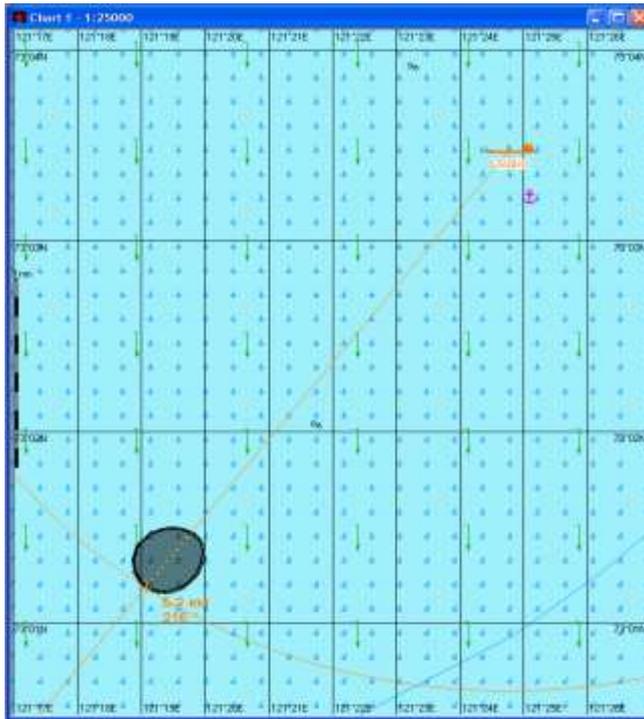


Рис. 1. Карта чрезвычайной ситуации на 4 часа с момента разлива



Рис. 2. Карта чрезвычайной ситуации на 24 часа с момента разлива  
(конфигурация нефтяного пятна)



Рис. 3. Карта чрезвычайной ситуации на 36 часов с момента разлива (расстояние от источника разлива до дальней кромки)

На рис. 4 – 7 показаны полученные зависимости параметров нефтяного пятна (длины и ширины) от направления ветра на 4 и 24 часа с момента разлива.

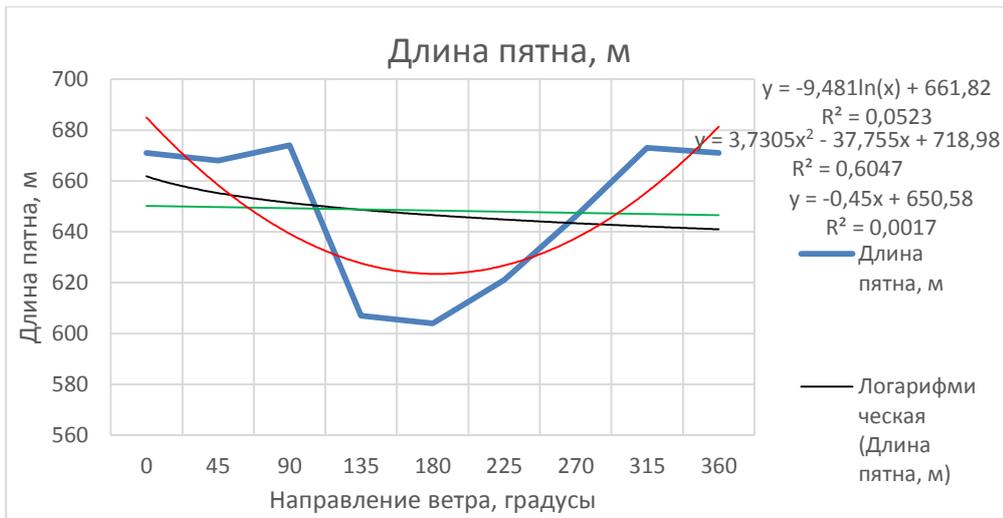


Рис. 4. Зависимость длины пятна от направления ветра на 4 часа с момента разлива

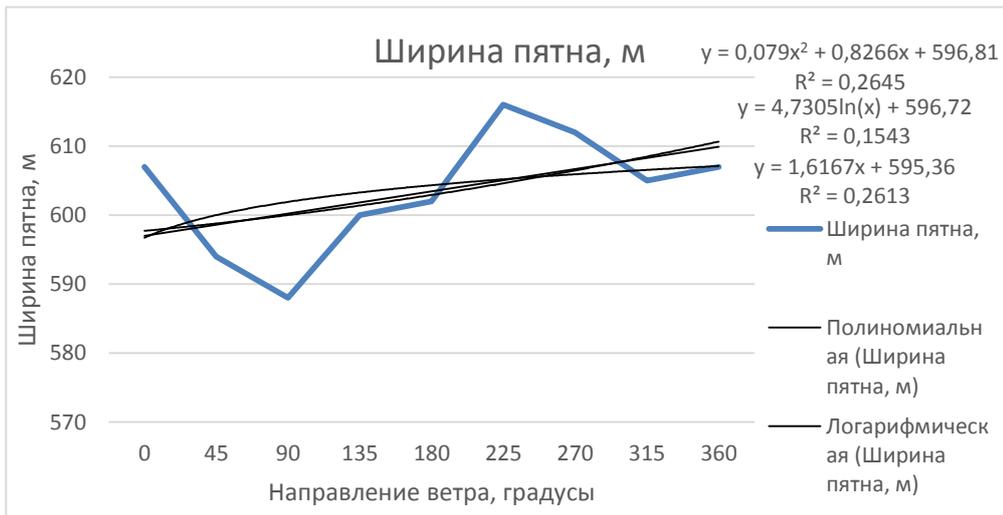


Рис. 5. Зависимость ширины пятна от направления ветра на 4 часа с момента разлива

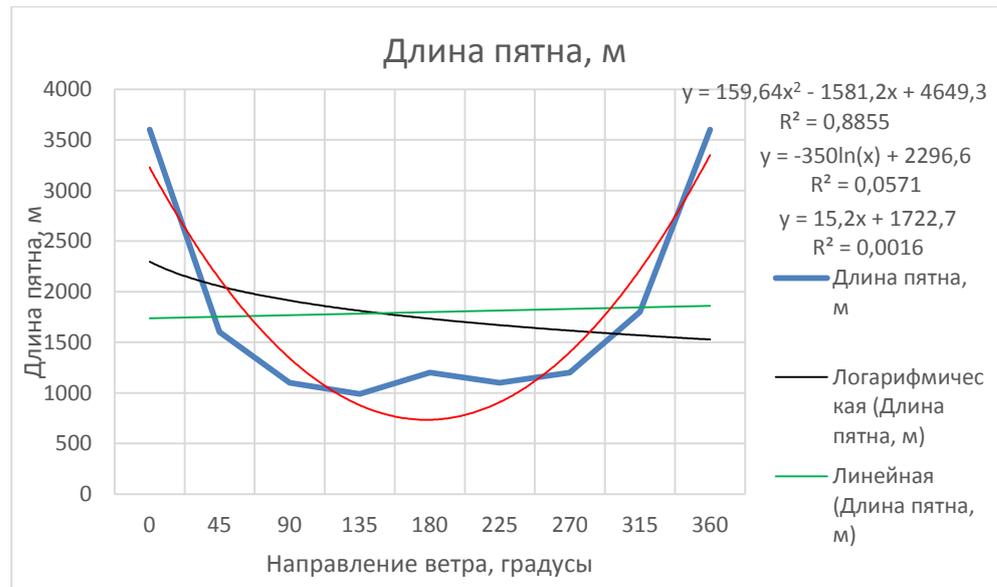


Рис. 6. Зависимость длины пятна от направления ветра на 24 часа с момента разлива

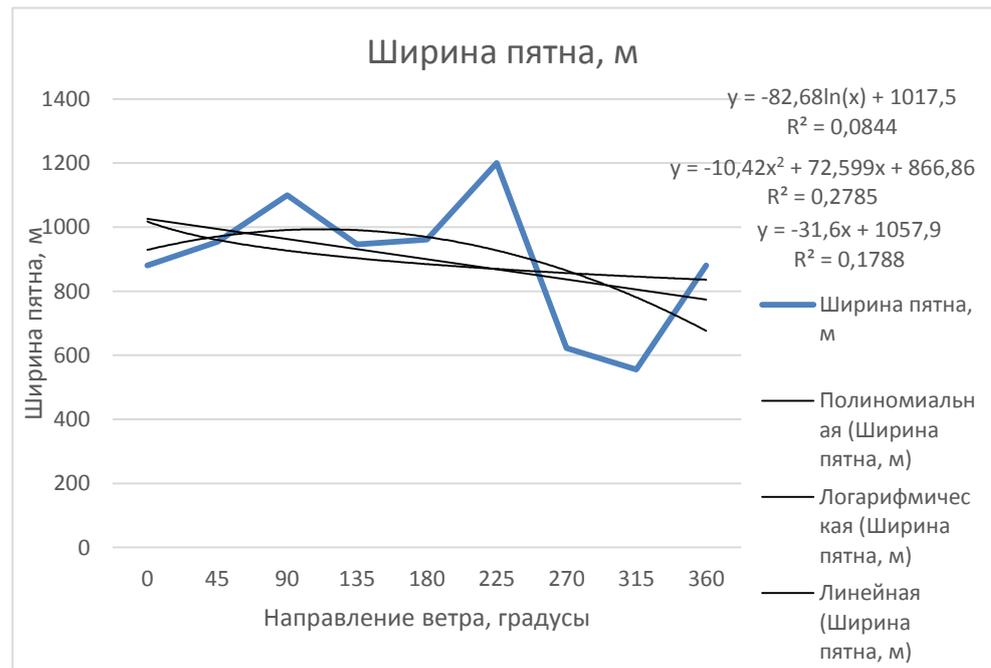


Рис. 7. Зависимость ширины пятна от направления ветра на 24 часа с момента разлива

Величина достоверности аппроксимации принимает максимальное значение:  $R^2 = 0,6047$  (длина пятна на 4 часа с момента разлива);  $R^2 = 0,2645$  (ширина пятна на 4 часа с момента разлива);  $R^2 = 0,8855$  (длина пятна на 24 часа с момента разлива);  $R^2 = 0,2785$  (ширина пятна на 24 часа с момента разлива).

Время достижения нефтяным пятном берега превышает 23 часа с момента разлива, что свидетельствует о возможности разработки эффективных мероприятий

по защите окружающей среды в случае реализации чрезвычайной ситуации в Оленекском заливе моря Лаптевых [10 – 12].

### **Заключение**

В результате проведенных исследований выполнены:

- обзор моделируемых процессов, влияющих на распространение нефтяного загрязнения в морских условиях;
- прогнозирование распространения нефтяного загрязнения в Оленекском заливе моря Лаптевых в количестве 8 сценариев, соответствующих различным направлениям ветра;
- разработка карт чрезвычайных ситуаций с указанием параметров разлива;
- построение зависимостей для оценки длины и ширины нефтяных пятен от направления ветра при разливах в Оленекском заливе моря Лаптевых.

Полученные результаты применены при создании регионального (бассейнового) плана по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов в Ленском бассейне.

### **Список литературы**

1. Определение координат пятна дизельного топлива при затоплении судна в порту / Б.М. Ташимов, Н.С. Родина, А. Н. Бородин, А. Н. Каленков. – Текст: электронный // Транспорт. Горизонты развития: Труды 1-го Международного научно-промышленного форума, Нижний Новгород - Новосибирск, 25–28 мая 2021 года. – Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО "ВГУВТ"), 2021. – С. 46. – URL: [http://вф-река-море.рф/2021/PDF/4\\_5.pdf](http://вф-река-море.рф/2021/PDF/4_5.pdf) (дата обращения: 27.04.2022).
2. Оценка воздействия разливов нефти на экологически чувствительные районы в Печорском бассейне / Е.Ю. Шматкова, А.Е. Пластинин, А.П. Балденков, А.Н. Бородин. – Текст: электронный // Великие реки - 2020: Труды 22-го международного научно-промышленного форума, Нижний Новгород, 27–29 мая 2020 года. – Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2020. – С. 18. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_44631516\\_19167764.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_44631516_19167764.pdf) (дата обращения: 10.05.2022).
3. Пластинин А.Е. Оценка риска возникновения разливов нефти на внутренних водных путях // Наука и техника транспорта. – 2015. – № 1. – С. 39-44. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_23146319\\_96013009.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23146319_96013009.pdf) (дата обращения: 11.04.2022).
4. Toz, A. C. Numerical modelling of oil spill in New York Bay / A. C Toz, B. Koseoglu, C. Sakar. - DOI 10.1515/aep-2016-0037. - Текст: электронный // Archives of Environmental Protection. - 2016. - Vol. 42 no. 4. - pp. 22–31. - URL: [https://www.researchgate.net/publication/309519305\\_Numerical\\_modelling\\_of\\_oil\\_spill\\_in\\_New\\_York\\_Bay](https://www.researchgate.net/publication/309519305_Numerical_modelling_of_oil_spill_in_New_York_Bay) (дата обращения: 11.02.2022).
5. Проблемы экономической безопасности: новые решения в условиях ключевых трендов экономического развития / М. Стуль, Ш. А. Смагулова, А. Е. Ермуханбетова [и др.]; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; Южно-Уральский государственный университет, Кафедра «Экономическая безопасность». – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2020. – 461 с. – ISBN 978-5-696-05149-9. – Текст: непосредственный.
6. Сравнительная динамика изменения качества дистиллированной и природной воды при длительном контакте с некоторыми судовыми конструкционными материалами / Н.Ш. Ляпина, И.Б. Мясникова, А.А. Иконников, А.Н. Бородин. – Текст: электронный // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2005. – № 12. – С. 171-176. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18411334> (дата обращения: 12.05.2022).
7. Навигационное описание. URL: <http://studenchik.ru> (дата обращения 5.04.2022).
8. Определение участков концентрации транспортных происшествий с участием судов в Республике Татарстан / Е.А. Батанина, А.Н. Бородин, О. Л. Домнина, А. Е. Пластинин.

- Текст: электронный // Морские интеллектуальные технологии. – 2020. – № 4-1 (50). – С. 161-168. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44517000> (дата обращения: 12.05.2022).
9. Проблемы экономической безопасности: новые глобальные вызовы и тенденции / Л. М. Анохин, Н. В. Анохина, О. Г. Аркадьева [и др.]; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; Южно-Уральский государственный университет; Кафедра «Экономическая безопасность». – Челябинск: Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), 2021. – 715 с. – ISBN 978-5-696-05206-9. – Текст: непосредственный.
10. Reshnyak, V. Evaluating environmental hazards of the potential sources of accidental spills / V. Reshnyak, O. Domnina, A. Platinin. - doi:10.1088/1755-1315/867/1/012046. - Текст: электронный // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021 International Symposium "Earth Sciences: History, Contemporary Issues and Prospects, ESHCIP 2021". IOP Publishing Ltd. - 2021. - С. 012046. - URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/867/1/012046/pdf> (дата обращения: 11.04.2022).
11. Бородин, А. Н. Совершенствование тренажерной подготовки по ликвидации разливов нефти при эксплуатации судов на внутренних водных путях / А. Н. Бородин. – Текст: электронный // Наука и устойчивое развитие общества. Наследие В.И. Вернадского. – 2009. – № 9. – С. 259-260. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_21213237\\_42203347.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_21213237_42203347.pdf) (дата обращения: 05.05.2022).
12. Защита устьевых участков малых рек от разливов нефти с судов / А.Н. Донина, А.Е. Пластинин, А.Н. Бородин, А.Н. Каленков. – Текст: электронный // Транспорт. Горизонты развития: Труды 1-го Международного научно-промышленного форума, Нижний Новгород - Новосибирск, 25–28 мая 2021 года. – Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО "ВГУВТ"), 2021. – С. 43. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_48326077\\_95624368.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_48326077_95624368.pdf) (дата обращения: 27.04.2022).

#### References

1. Opredelenie koordinat pyatna dizel'nogo topliva pri zatoplenii sudna v portu [Determination of diesel fuel spot coordinates during ship flooring in port] / Boris M. Tashimov, Natalia S. Rodina, Alexey N. Borodin, Aleksandr N. Kalenkov. – Текст: электронный // Транспорт. Горизонты развития: Труды 1-го Международного научно-промышленного форума, Нижний Новгород - Новосибирск, 25–28 мая 2021 года. – Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО "ВГУВТ"), 2021. – p. 46. (In Russ). – URL: [http://vf-reka-more.rf/2021/PDF/4\\_5.pdf](http://vf-reka-more.rf/2021/PDF/4_5.pdf) (дата обращения: 27.04.2022).
2. Otsenka vozdeistviya razlivov nefi na ehkologicheski chuvstvitel'nye raiony v Pechorskom basseine [Assessment of the influence of oil spills on ecologically sensitive areas in Pechora basin] / Elena Y. Shmatkova, Andrey E. Platinin, Anton P. Baldenkov, Alexey N. Borodin. – Текст: электронный // Великие реки - 2020: Труды 22-го международного научно-промышленного форума, Нижний Новгород, 27–29 мая 2020 года. – Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2020. – p. 18. (In Russ). – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_44631516\\_19167764.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_44631516_19167764.pdf) (accessed 10.05.2022).
3. Platinin A.E. Ocenka riska vozniknoveniya razlivov nefi na vnutrennix vodny'x putyax [Assessment of the risk of oil spills on inland waterways] // Наука и техника транспорта. 2015, no 1, pp. 39-44. (In Russ). – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_23146319\\_96013009.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23146319_96013009.pdf) (accessed 11.04.2022)
4. Toz, A. C. Numerical modelling of oil spill in New York Bay / A. C Toz, B. Koseoglu, C. Sakar. - DOI 10.1515/aep-2016-0037 // *Archives of Environmental Protection*. - 2016. - Vol. 42 no. 4. - pp. 22–31. - URL: [https://www.researchgate.net/publication/309519305\\_Numerical\\_modelling\\_of\\_oil\\_spill\\_in\\_New\\_York\\_Bay](https://www.researchgate.net/publication/309519305_Numerical_modelling_of_oil_spill_in_New_York_Bay) (accessed 11.02.2022).

5. Problemy ehkonomicheskoi bezopasnosti: novye resheniya v usloviyakh klyuchevykh trendov ehkonomicheskogo razvitiya [Problems of economic security: new solutions in the context of key trends in economic development] / M. Stul', S.H. A. Smagulova, A. E. Ermukhanbetova [i dr.]; Ministerstvo nauki i vysshego obrazovaniya Rossiiskoi Federatsii; Yuzhno-Ural'skii gosudarstvennyi universitet, Kafedra «Ehkonomicheskaya bezopasnost'». – Chelyabinsk: Izdatel'skii tsentr YUURGU, 2020. – 461 p. (In Russ). – ISBN 978-5-696-05149-9. – Tekst: neposredstvennyi.
6. Sravnitel'naya dinamika izmeneniya kachestva distillirovannoi i prirodnoi vody pri dlitel'nom kontakte s nekotorymi sudovymi konstruksionnymi materialami [The comparative dynamics changing quality of distilled and natural water after it long contact with ship's constructional materials] / N.S. Lyapina, I.B. Myasnikova, A.A. Ikonnikov, A.N. Borodin. – Tekst: ehlektronnyi // *Vestnik Volzhskoi gosudarstvennoi akademii vodnogo transporta* [Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport]. – 2005. – no. 12. – pp. 171-176. (In Russ). – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18411334> (accessed 12.05.2022).
7. Navigatsionnoe opisanie. URL: <http://studenchik.ru> (accessed 5.04.2022).
8. Ekaterina A. Batanina, Alexey N. Borodin, Olga L. Domnina, Andrey E. Plastinin, Determination of areas of concentration of transport accidents with the participation of ships in the Republic of Tatarstan, *Marine intellectual technologies*. № 4 part 1, pp. 161-168 (2020) doi: 10.37220/MIT.2020.50.4.022.
9. Problemy ehkonomicheskoi bezopasnosti: novye global'nye vyzovy i tendentsii [Problems of Economic Security: New Global Challenges and Trends] / L. M. Anokhin, N. V. Anokhina, O. G. Arkad'eva [i dr.]; Ministerstvo nauki i vysshego obrazovaniya Rossiiskoi Federatsii; Yuzhno-Ural'skii gosudarstvennyi universitet; Kafedra «Ehkonomicheskaya bezopasnost'». – Chelyabinsk: Yuzhno-Ural'skii gosudarstvennyi universitet (natsional'nyi issledovatel'skii universitet), 2021. – 715 p. (In Russ). – ISBN 978-5-696-05206-9. – Tekst: neposredstvennyi.
10. Reshnyak, V. Evaluating environmental hazards of the potential sources of accidental spills / V. Reshnyak, O. Domnina, A. Plastinin. - doi:10.1088/1755-1315/867/1/012046. - Текст: электронный // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021 International Symposium "Earth Sciences: History, Contemporary Issues and Prospects, ESHCIP 2021". IOP Publishing Ltd. - 2021. - p. 012046. - URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/867/1/012046/pdf> (accessed 11.04.2022).
11. Alexey N. Borodin. Improving simulator training for oil spill response during the operation of ships on inland waterways. *Science and sustainable development of society. Legacy of V.I. Vernadsky*. 2009. No. 9. pp. 259-260 (In Russ).
12. Zashchita ust'evykh uchastkov malykh rek ot razlivov nefi s sudov [Protection of small river mounting areas against oil spills from ships] / Anastasia N. Donina, Andrey E. Plastinin, Alexey N. Borodin, Aleksandr N. Kalenkov. – Tekst: ehlektronnyi // Transport. Gorizonty razvitiya: Trudy 1-go Mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma, Nizhnii Novgorod - Novosibirsk, 25–28 maya 2021 goda. – Nizhnii Novgorod: Volzhskii gosudarstvennyi universitet vodnogo transporta (FGBOU VO "VGUVT"), 2021. – p. 43. (In Russ). – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_48326077\\_95624368.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_48326077_95624368.pdf) (accessed 27.04.2022).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Андрей Евгеньевич Пластинин**, д.т.н., доцент, профессор кафедры охраны окружающей среды и производственной безопасности, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: [plastininae@yandex.ru](mailto:plastininae@yandex.ru)

**Andrey E. Plastinin**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Environmental Protection and Industrial Safety, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterova street, Nizhny Novgorod, Russia, 603951

**Александр Николаевич Каленков**, к.т.н.,  
доцент кафедры охраны окружающей среды и  
производственной безопасности, Волжский  
государственный университет водного  
транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г.  
Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail:  
kaf\_oospb@vsuwt.ru

**Aleksandr N. Kalenkov**, Ph.D.(Eng), Associate  
Professor of the Department of Environmental  
Protection and Industrial Safety, Volga State  
University of Water Transport, 5, Nesterova  
street, Nizhny Novgorod, Russia, 603951

Статья поступила в редакцию 01.09.2022; опубликована онлайн 20.06.2023.  
Received 01.09.2022; published online 20.06.2023.

УДК 629.5

DOI: 10.37890/jwt.vi75.380

## **Процесс моделирования разложения нефтепродуктов в воде**

**Е.А. Шильникова**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8035-6207>

**О.В. Рослякова**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2265-7815>

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

**Аннотация:** Затонувшие судовые энергетические установки являются одним из наиболее опасных видов морского загрязнения. Причиной этого является то, что различные виды нефтепродуктов оседают на дне моря и могут оставаться там на протяжении длительного времени, что наносит непоправимый вред морской и окружающей среде. В последнее время проблема разложения нефтепродуктов в воде стала особенно актуальной. Нефть и ее токсичные компоненты могут быстро разрушить экосистему, что повлечет за собой драматические последствия для живых организмов. Для решения этой проблемы необходимо проводить моделирование процессов разложения как в лабораторных условиях, так и на реальных объектах. В данной статье рассмотрим основные подходы и этапы моделирования разложения нефтепродуктов от затонувших судов в воде.

**Ключевые слова:** водный транспорт, затонувшие суда, СЭУ, загрязнение окружающей среды, моделирование, разложение нефтепродуктов.

## **The process of modeling the decomposition of petroleum products in water**

**Ekaterina A. Shilnikova**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8035-6207>

**Oksana O. Roslyakova**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2265-7815>

*Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia*

**Abstract:** Sunken marine power plants are one of the most dangerous types of marine pollution. The reason for this is that various types of petroleum products settle at the bottom of the sea and can remain there for a long time, which causes irreparable harm to the environment. Recently, the problem of decomposition of petroleum products in water has become particularly relevant. Oil and its toxic components can quickly destroy the ecosystem, which will entail dramatic consequences for living organisms. To solve this problem, it is necessary to conduct modeling of decomposition processes, both in laboratory conditions and on real objects. In this article, we will consider the main approaches and stages of modeling the decomposition of petroleum products from sunken ships in water.

**Keywords:** water transport, sunken ships, marine power plants, environmental pollution, modeling, decomposition of petroleum products.

### **Введение**

Затонувшие суда с нефтепродуктами представляют серьезную угрозу для окружающей среды. Даже после многих лет после катастрофы, нефть и ее токсичные компоненты могут оказывать отрицательное влияние на морскую живность, воду, пляжи и места пересечения водного транспорта.

Согласно статистическим данным о транспортных происшествиях Федеральной службы по надзору в сфере транспорта управления государственного морского и речного надзора на рис. 1 приведены показатели аварийности на внутренних водных путях по месяцам [1].

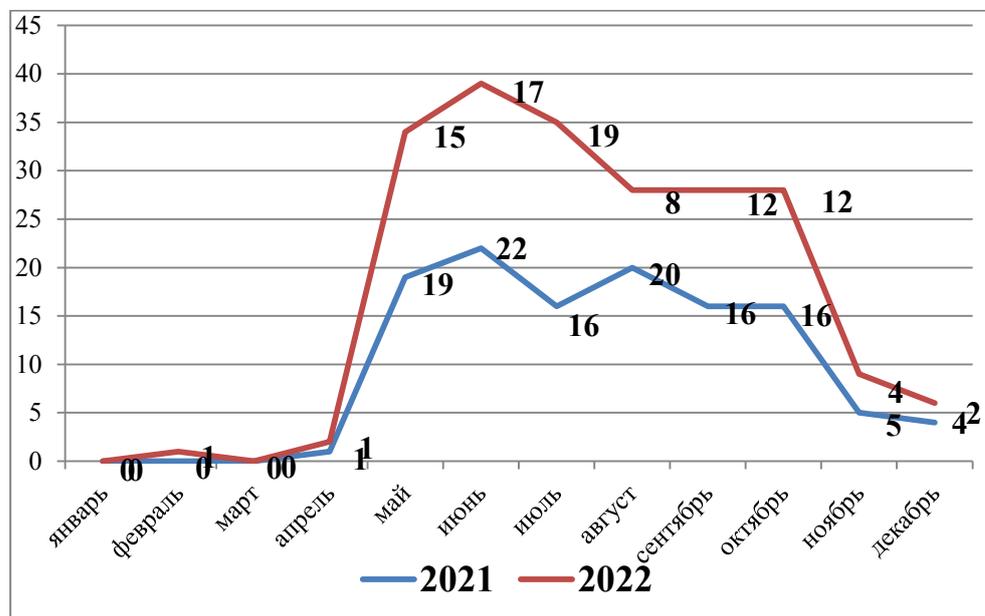


Рис. 1. Показатели аварийности на ВВП по месяцам

Количество инцидентов на ВВП РФ в 2022 году в сравнении с 2021 годом уменьшилось на 26% (на 31 инцидент). В табл. 1 приведены данные о количестве транспортных происшествий по видам за 2021 г. и 2022 г.

Таблица 1

**Транспортные происшествия по видам**

Вид транспортного происшествия	Года	
	2021 год	2022 год
Столкновение	13	12
Затопление	3	5
Удар, навал	55	35
Повреждение ГТС	19	7
Посадка на мель	28	23
Другие	1	9

Из табл. 1 видно, что затопление судов происходит на регулярной основе. Официальные данные о количестве аварий с затоплений имеются с 2015 года и до этого периода аварии с затоплением тоже имели место. Таким образом, проблема накопления затопленных судов есть, и главным последствием этого является загрязнение воды нефтепродуктами, используемыми в судовых энергетических установках.

Разлив нефти приводит к серьезным последствиям, таким как загрязнение водных объектов, смерть рыбы и другой морской фауны, загрязнению побережья, а также угрозе для здоровья людей. Поэтому прогнозирование разлива нефти является очень важной задачей в области охраны окружающей среды и предотвращения экологических катастроф. Данной проблеме посвящены многие научные работы [2-5].

Из-за затонувших судов с нефтью в воде появляются маслянистые пятна, которые могут распространяться в радиусе многих километров. Это оказывает разрушительное воздействие на морскую живность. Скопления нефти на поверхности воды создают токсичные условия, которые могут уничтожать кормовые базы рыбы и других животных моря.

Изучение процесса разложения нефтепродуктов является важным аспектом исследований. Это включает в себя анализ продуктов разложения нефти и определение их экологического влияния на водную экосистему. Кроме того, исследования позволяют разрабатывать новые технологии и методы по борьбе с загрязнением водной среды.

### **Материалы и методы**

Исследование влияния разложения нефтепродуктов от затонувших судовых энергетических установок является крайне важной задачей, так как оно поможет определить масштабы ущерба, который наносят нефтепродукты в окружающей среде.

Условно процесс моделирования можно разделить на 8 этапов, которые представлены на рис. 2.

Рассмотрим подробнее все процессы по шагам. Первым шагом моделирования разложения нефтепродуктов от затонувших судов является анализ их физико-химических свойств, таких как:

- 1) плотность – это масса нефтепродукта на единицу объема. Она изменяется в зависимости от типа нефтепродукта и может использоваться для определения его качества и чистоты [6];
- 2) вязкость – это сопротивление нефтепродукта к потоку. Высокая вязкость означает, что продукт трудно течет, а низкая вязкость обозначает более легкое течение. Она зависит от температуры;
- 3) температура кипения – это температура, при которой продукт начинает испаряться. Она зависит от состава продукта и давления, при котором измеряется;
- 4) температура вспышки – минимальная температура, при которой пары нефтепродукта начинают воспламеняться при соприкосновении с пламенем. Это важно для безопасности при транспортировке и хранении нефтепродуктов;
- 5) точка замерзания – это температура, при которой нефтепродукт начинает замерзать. Она важна для транспортировки в холодные климатические условия;
- 6) конденсация – это способность нефтепродукта превращаться в жидкость при сжатии. Она может использоваться для определения содержания легких фракций в нефтепродуктах;
- 7) цвет – это важный показатель качества нефтепродуктов. Он может указывать на содержание загрязнений в продукте;
- 8) растворимость в воде – нефтепродукты обычно не растворимы в воде, поскольку они содержат главным образом углеводороды. Однако некоторые добавки могут изменять растворимость и создавать эмульсии.

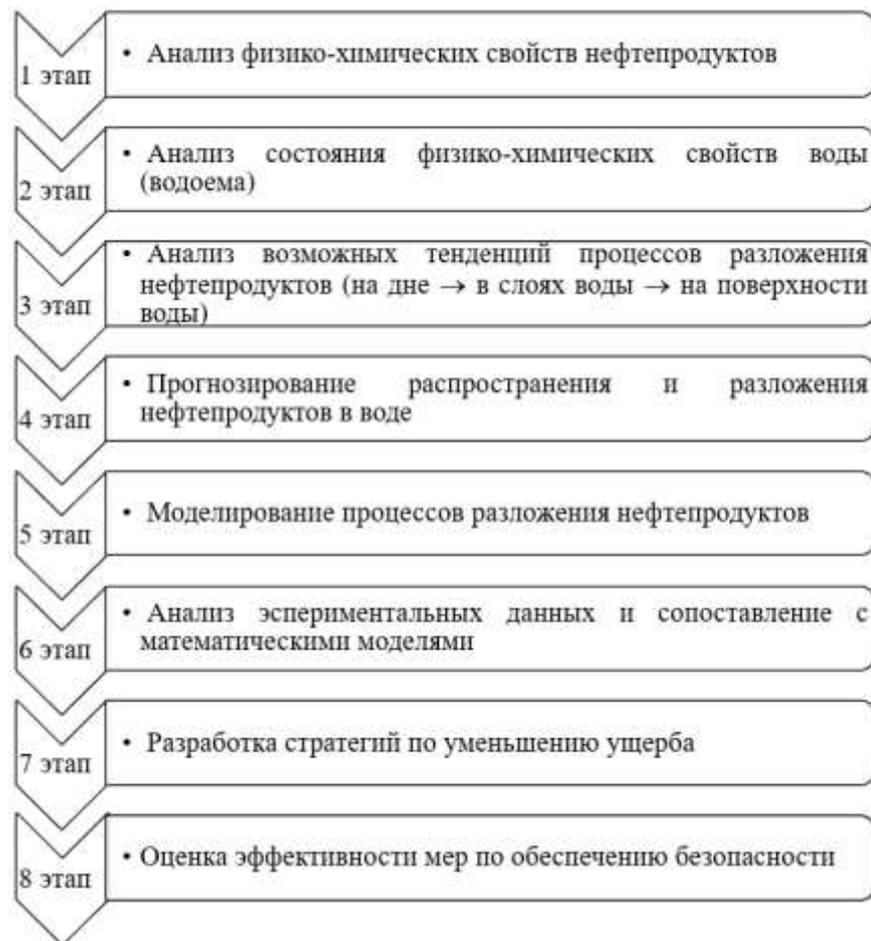


Рис. 2. Этапы процесса моделирования разложения нефтепродуктов от затонувших судов

Для анализа физико-химических свойств нефтепродуктов используются различные методы, такие как хроматография, термический анализ и спектроскопия [7].

Вторым этапом моделирования разложения нефтепродуктов от затонувших судов является описание начального состояния воды. Модель должна включать различные параметры воды, такие как температура, pH, скорость течения, соленость и содержание микроорганизмов, которые оказывают влияние на разложение нефтепродуктов.

Оценка тенденций – это третий этап в моделировании разложения нефтепродуктов от затонувших судов энергетических установок. Затонувшее судно будет постепенно разлагаться в водной среде, что может привести к негативным последствиям для окружающей среды и местной экосистемы. При этом надо учитывать, что такие вещества как бункеровочные масла, газ-конденсаты и нефтепродукты выходят на уровень водной поверхности и процесс разложения происходит на ней.

Четвертый этап – это прогнозирование распространения и разложения нефтепродуктов в воде. Модель должна учитывать различные факторы, такие как ветер, текущие моря и океаны, размеры затонувшего судна и количество нефтепродуктов, чтобы предсказать, как быстро нефтепродукты распространятся в водной среде.

Чтобы лучше понимать процесс разложения нефтепродуктов в воде и создать эффективные методы борьбы с этой проблемой, многие исследователи и авторы в своих работах используют различные модели [8-12]. В частности, в последнее время наиболее часто упоминаются модель Фэя, модель Гауссова шлейфа и модель Ролланда-Шоу.

В настоящее время одной из наиболее широко используемых моделей для прогнозирования и описания распространения нефтепродуктов в воде является модель Фэя, разработанная в 1979 году Джоном Фэем и Джеком Осборном. Это модель, которая разбивает систему на зоны концентрации, где каждый объект рассматривается как источник или потребитель, и предсказывает концентрацию нефтепродуктов в воде в каждой из этих зон на основе различных параметров.

Модель Фэя была широко применена для решения различных задач, связанных с нефтесбросами в морской среде, включая определение объема пролитой нефти, оценку скорости ее распространения и прогнозирование ее изменения в будущем. Одним из основных достоинств модели Фэя является то, что она учитывает объединенные эффекты ветра и течения, что позволяет точнее прогнозировать движение нефтепродуктов. Кроме того, модель Фэя позволяет рассчитывать как поверхностные концентрации нефтепродуктов, так и концентрации в более глубоких слоях морской воды.

Одним из ключевых параметров, которые влияют на концентрацию нефтепродуктов в воде в модели Фэя, является эмульсия, которая образуется в результате смешения нефти и воды в процессе распространения. Поэтому качество данных и точность оценки параметров для определения эмульсии имеет большое значение для точности прогнозов.

Одной из главных проблем при работе с моделью Фэя является тот факт, что модель не учитывает влияние физических процессов на движение нефтепродуктов в морской среде, таких как перенос тепла или изменение концентрации солей в воде. Эти факторы могут значительно повлиять на распространение нефтепродуктов, поэтому часто надо совмещать модель Фэя с другими моделями физических процессов.

Рассмотрим несколько подходов к моделированию процессов разложения. Один из них основан на использовании уравнения переноса массы и массового баланса. Этот подход позволяет описать различные процессы, такие как диффузия, конвекция и химическая реакция. Другой подход заключается в создании компьютерных моделей на основе метода конечных элементов. Этот метод позволяет проводить более точные вычисления, но требует большего количества вычислительных ресурсов.

Модель Гауссова шлейфа – это математическая модель, которая используется для моделирования процессов разложения нефтепродуктов в воде. Эта модель основана на теории гидродинамики и теплообмена, и она может быть использована, чтобы предсказать распределение нефтепродуктов в водной среде, что в свою очередь позволяет определить оптимальные методы очистки воды.

Использование модели Гауссова шлейфа позволяет получить детальную картину того, как нефтепродукты распределены в воде в зависимости от времени и местоположения. Это делает возможным точное определение площади оказания воздействия и оптимального способа борьбы с загрязнением воды.

Модель Гауссова шлейфа основывается на принципе концентрации. Она осуществляет расчеты концентрации загрязнений вокруг их источника и определяет, как они распространяются в воде. Эта модель учитывает такие факторы, как скорость ветра, течение, глубина воды и наличие поверхностных стоков.

При моделировании разложения нефтепродуктов в воде с помощью модели Гауссова шлейфа следует учитывать такие факторы, как химическая стабильность

нефтепродуктов и коэффициент растворимости. Эти параметры могут существенно влиять на скорость разложения нефтепродуктов в воде.

Модель Гауссова шлейфа использует набор дифференциальных уравнений в частных производных для описания переноса и трансформации нефтепродуктов в воде. Уравнения учитывают баланс массы и энергии в различных точках водной толщи и решаются численными методами.

Другая модель, широко используемая для моделирования разложения нефтепродуктов в воде, это модель Ролларда-Шоу. В этой модели учитываются не только химические реакции, но и физические процессы, такие как диффузия и конвекция. Эта модель позволяет определить, как быстро нефтепродукты будут удаляться из воды.

Эта модель была разработана на основе предположения, что капли масла в воде имеют сферическую форму и имеют однородное распределение по размерам

Модель Ролларда-Шоу включает следующие предположения и уравнения:

- капли масла имеют однородное распределение по размерам и сферическую форму;
- скорость диффузии пропорциональна градиенту концентрации масла в воде;
- скорость коалесценции пропорциональна квадрату размера капли масла;
- скорость осаждения пропорциональна квадрату размера капель масла и разности плотностей масла и воды.

Уравнение Ролларда-Шоу связывает концентрацию масла со временем и расстоянием, которое проходят капли масла в воде, имеет вид [13]:

$$C(t, x) = C_0 \cdot e^{-\frac{(x-vt)^2}{4Dt}}$$

где  $C(t, x)$  – концентрация масла в момент времени  $t$  и на расстоянии  $x$ ;

$C_0$  – начальная концентрация масла;

$v$  – скорость осаждения капель масла,

$D$  коэффициент диффузии масла в воде;

$t$  – время.

Пятым этапом моделирования разложения нефтепродуктов от затонувших судов является оценка влияния нефтепродуктов. Модель должна также предсказать влияние нефтепродуктов на окружающую среду и живые организмы, такие как рыбы, кораллы и другие морские животные. Для данного шага моделирования необходимо проведение экспериментов. Научно-исследовательские лаборатории, занимающиеся проблемами разложения нефтепродуктов в воде, проводят эксперименты, которые затем анализируются и используются при создании математических моделей [14]. Эксперименты могут проводиться как в лабораторных условиях, так и на реальных объектах.

Шестой этап – анализ полученных данных. Результаты экспериментов и математических моделей помогают понять процессы разложения нефтепродуктов в воде и представить их в виде графиков, таблиц и диаграмм. Эти данные могут быть полезными для принятия решения о необходимости принятия мер по улучшению состояния водных ресурсов.

Седьмой этап в моделировании представляет собой выбор стратегий уменьшения ущерба. На основе прогнозируемых данных должны разрабатываться стратегии для минимизации воздействия нефтепродуктов на окружающую среду и живые организмы. Такие стратегии включают использования барьеров, засыпание, буксировку судна на берег, контроль загрязнения, перекачку нефтепродуктов на другой танкер и т.д. [15].

Последним этапом моделирования разложения нефтепродуктов от затонувших судов является оценка эффективности введенных мер и внесение корректировок в систему, если это необходимо.

### Обсуждение

Моделирование разложения нефтепродуктов в воде продолжает использоваться как важный инструмент для оценки экологических последствий нефтяных разливов и планирования мер по защите окружающей среды. Необходимо отметить, что моделирование разложения нефтепродуктов в воде не является совершенным и может быть предметом дискуссий и споров среди экспертов. Например, модели могут не учитывать многих факторов, таких как наличие других веществ в воде, которые могут повлиять на разложение нефтепродуктов. Кроме того, развитие более точных и комплексных моделей в будущем может помочь улучшить понимание процессов разложения нефтепродуктов в воде и способствовать более эффективной борьбе с экологическими катастрофами.

### Заключение

Каждая из перечисленных в статье моделей имеет свои преимущества и недостатки, а также возможности для улучшения и доработки. В целом использование моделей при описании процесса разложения нефтепродуктов в воде позволяет более точно оценить масштабы проблемы, а также разработать наиболее эффективные методы борьбы с ним.

В заключение можно сказать, что моделирование разложения нефтепродуктов от затонувших судов является важным инструментом для понимания процессов, происходящих при загрязнении водных ресурсов нефтью от судовых энергетических установок и для разработки методов борьбы с этим явлением. Также важно продолжать научные исследования влияния разложения нефтепродуктов от затонувших судовых энергетических установок, так как они имеют огромное значение для сохранения морской и окружающей среды. Исследования позволяют не только определить масштабы проблемы, но и разработать эффективные методы ее решения.

### Список литературы

1. Обзор аварийности с судами на море и на внутренних водных путях Российской Федерации за 2022 год, Федеральная служба по надзору в сфере транспорта управление государственного морского и речного надзора // Москва. 2023. – 43 с. – Текст : непосредственный.
2. Каленков, А.Н., Прогнозирование разливов нефти с судов в Амурском бассейне / А.Н. Каленков, А.Е. Пластинин // Научные проблемы водного транспорта. – 2023. – № 74. – С. 216-228. DOI: 10.37890/jwt.vi74.341.
3. Наумов, В.С. Особенности прогнозирования в бассейновых планах по предупреждению и ликвидации разливов нефти / В.С. Наумов., А.Е. Пластинин, Н.И. Волкова, Н.С. Отделкин. – Текст : электронный // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2018. – № 57. – С. 41-51. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-prognozirovaniya-v-basseynovyh-planah-po-preduprezhdeniyu-i-likvidatsii-razlivov-nefti/viewer> (дата обращения: 03.05.2023).
4. Наумов, В.С. Определение вероятных районов разливов нефти в Цимлянском водохранилище / В.С. Наумов, А.Е. Пластинин // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2017. – № 53. – С. 75-81. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-veroyatnyh-rayonov-razlivov-nefti-v-tsimlyanskom-vodohranilische/viewer> (дата обращения: 03.05.2023).
5. Пластинин, А.Е. Оценка ущерба при разливах нефти на водных объектах / А.Е. Пластинин, В.С. Горбунов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2012. – № 33. – С. 53-59. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-uscherba-pri-razlivah-nefti-na-vodnyh-obektah> (дата обращения: 03.05.2023).
6. Мамонов, А.А. Измерение плотности нефтепродуктов и создание средств измерений коэффициентов объемного расширения нефтепродуктов / А.А. Мамонов, В.Я. Черепанов, Г.В. Шувалов, О.А. Ясырова. – Текст : электронный // Интерэкспо Гео-

- Сибирь. – 2011. – №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izmerenie-plotnosti-nefteproduktov-i-sozdanie-sredstv-izmereniy-koeffitsientov-obemnogo-rasshireniya-nefteproduktov> (дата обращения: 03.05.2023).
7. Шувалов, Г.В. Приборы экспресс-анализа нефтепродуктов / Г.В. Шувалов. – Текст : электронный // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2007. – №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pribory-ekspress-analiza-nefteproduktov> (дата обращения: 03.05.2023).
  8. Wilson, M. Predicting the movement of oil / M. Wilson, L. Graham, Ch. Hale, E. Maung-Douglass, St. Sempier, T. Skelton, LaDon Swann. – Текст : электронный // Oil spill science. – 2017. – 8 p. URL: <https://masgc.org/oilscience/oil-spill-science-predicting-movement.pdf> (дата обращения: 03.05.2023).
  9. Liu, Y. Monitoring and Modeling the Deepwater Horizon Oil Spill: A Record-Breaking Enterprise / Y. Liu, A. Macfadyen, Ji Z.-G., R. H. Weisberg. – Текст : электронный // American Geophysical Union. – 2011. – pp. 1-7. URL: [https://www.researchgate.net/publication/258791658\\_Monitoring\\_and\\_modeling\\_the\\_Deep\\_water\\_Horizon\\_oil\\_spill\\_a\\_record-breaking\\_enterprise\\_edited\\_by\\_Y\\_Liu\\_A\\_MacFadyen\\_Z-G\\_Ji\\_and\\_RH\\_Weisberg](https://www.researchgate.net/publication/258791658_Monitoring_and_modeling_the_Deep_water_Horizon_oil_spill_a_record-breaking_enterprise_edited_by_Y_Liu_A_MacFadyen_Z-G_Ji_and_RH_Weisberg) (дата обращения: 03.05.2023).
  10. Keramea, P. Oil Spill Modeling: A Critical Review on Current Trends, Perspectives, and Challenges / P. Keramea, K. Spanoudaki, G. Zodiatis, G. Gikas, G. Sylaios. – DOI:10.3390/jmse9020181. – Текст : электронный // Journal of Marine Science and Engineering. – 2021. – 9(2):181. URL: [https://www.researchgate.net/publication/349282028\\_Oil\\_Spill\\_Modeling\\_A\\_Critical\\_Review\\_on\\_Current\\_Trends\\_Perspectives\\_and\\_Challenges](https://www.researchgate.net/publication/349282028_Oil_Spill_Modeling_A_Critical_Review_on_Current_Trends_Perspectives_and_Challenges) (дата обращения: 03.05.2023).
  11. Zhao, L. Evolution of bubble size distribution from gas blowout in shallow water. / Zhao, L.; Boufadel, M.C.; Lee, K.; King, T.; Loney, N.; Geng, X. – Текст : электронный // Journal of Geophysical Research: Oceans – 2016. – 121, – p. 1573-1599, URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2015JC011403> (дата обращения: 03.05.2023).
  12. Muddassir Nazir. Multimedia Fate of Oil Spills in a Marine Environment – An Integrated Modelling Approach. / Muddassir Nazir, Faisal Khan, Paul Amyotte, Rehan Sadiq. – DOI:10.1016/j.psep.2007.10.002. – Текст : электронный // Process Safety and Environmental Protection. – 2008. – 86 (2). URL: [https://www.researchgate.net/publication/44093455\\_Multimedia\\_Fate\\_of\\_Oil\\_Spills\\_in\\_a\\_Marine\\_Environment\\_-\\_An\\_Integrated\\_Modelling\\_Approach](https://www.researchgate.net/publication/44093455_Multimedia_Fate_of_Oil_Spills_in_a_Marine_Environment_-_An_Integrated_Modelling_Approach) (дата обращения: 03.05.2023).
  13. Abdolali, A. Numerical Modeling of the Spreading and Evaporation of Oil Spills on Water. / A. Abdolali, A. Muhammad, K. Mukarami. // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2012. – 81. pp. 86-96.
  14. Батманов, С.В. Обзор экспериментальных исследований по аварийным проливам нефтепродуктов / С.В. Батманов, М.Р. Самохин, С.П. Сухарский, В.А. Тищенко, Т.А. Тищенко. – Текст : электронный // Пожары и ЧС. – 2019. – №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-eksperimentalnyh-issledovaniy-po-avariynym-prolivam-nefteproduktov> (дата обращения: 04.05.2023).
  15. Пивоваров, А.Т. Экологические проблемы применения нефтепродуктов / А.Т. Пивоваров, Ю.Б. Салина. – Текст : электронный // Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. – 2007. – №6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskie-problemy-primeneniya-nefteproduktov> (дата обращения: 04.05.2023).

#### References

1. Review of accidents with ships at sea and on inland waterways of the Russian Federation for 2022, Federal Service for Supervision in the Field of Transport Department of State Marine and River Supervision // Moscow. 2023. – 43 p. – Text : direct.
2. Kalenkov, A.N., Forecasting of oil spills from ships in the Amur basin / A.N. Kalenkov, A.E. Plastinin // Scientific problems of water transport. – 2023. – No. 74. – pp. 216-228. DOI: 10.37890/jwt.vi74.341.

3. Naumov, V.S. Features of forecasting in basin plans for the prevention and elimination of oil spills / V.S. Naumov, A.E. Plastinin, N.I. Volkova, N.S. Otdelkin. – Text : electronic // Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport. – 2018. – No. 57. – PP. 41-51. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-prognozirovaniya-v-basseynovyh-planah-po-preduprezhdeniyu-i-likvidatsii-razlivov-nefti/viewer> (accessed: 03.05.2023).
4. Naumov, V.S. Determination of probable areas of oil spills in the Tsimlyansk reservoir / V.S. Naumov, A.E. Plastinin // Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport. – 2017. – No. 53. – PP. 75-81. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-veroyatnyh-rayonov-razlivov-nefti-v-tsimlyanskom-vodohranilische/viewer> (accessed: 03.05.2023).
5. Plastinin, A.E. Assessment of damage during oil spills on water bodies / A.E. Plastinin, V.S. Gorbunov // Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport. - 2012. – No. 33. – PP. 53-59. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-uscherba-pri-razlivah-nefti-na-vodnyh-obektah> (date of application: 03.05.2023).
6. Mamonov, A.A. Measuring the density of petroleum products and the creation of measuring instruments for the coefficients of volumetric expansion of petroleum products / A.A. Mamonov, V.Ya. Cherepanov, G.V. Shuvalov, O.A. Yasyrova. – Text : electronic // Interexpo Geo-Siberia. – 2011. – No.2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izmerenie-plotnosti-nefteproduktov-i-sozdanie-sredstv-izmereniy-koeffitsientov-obemnogo-rasshireniya-nefteproduktov> (accessed: 03.05.2023).
7. Shuvalov, G.V. Devices for express analysis of petroleum products / G.V. Shuvalov. – Text : electronic // Interexpo Geo-Siberia. - 2007. – No.2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pribery-ekspres-analiza-nefteproduktov> (accessed 03.05.2023).
8. Wilson, M. Predicting the movement of oil / M. Wilson, L. Graham, Ch. Hale, E. Maung-Douglass, St. Sempier, T. Skelton, LaDon Swann. – Text : electronic // Oil spill science. – 2017. – 8 p. URL: <https://masgc.org/oilscience/oil-spill-science-predicting-movement.pdf> (date of application: 03.05.2023).
9. Liu, Y. Monitoring and Modeling the Deepwater Horizon Oil Spill: A Record-Breaking Enterprise / Y. Liu, A. Macfadyen, Ji Z.-G., R. H. Weisberg. – Text : electronic // American Geophysical Union. – 2011. – pp. 1-7. URL: [https://www.researchgate.net/publication/258791658\\_Monitoring\\_and\\_modeling\\_the\\_deep\\_water\\_horizon\\_oil\\_spill\\_a\\_record-breaking\\_enterprise\\_edited\\_by\\_Y\\_Liu\\_A\\_MacFadyen\\_Z-g\\_ji\\_and\\_rh\\_weisberg](https://www.researchgate.net/publication/258791658_Monitoring_and_modeling_the_deep_water_horizon_oil_spill_a_record-breaking_enterprise_edited_by_Y_Liu_A_MacFadyen_Z-g_ji_and_rh_weisberg) (accessed 03.05.2023).
10. Keramea, P. Oil Spill Modeling: A Critical Review on Current Trends, Perspectives, and Challenges / P. Keramea, K. Spanoudaki, G. Zodiatis, G. Gikas, G. Sylaios. – DOI:10.3390/jmse9020181. – Text: electronic // Journal of Marine Science and Engineering. – 2021. – 9(2):181. URL: [https://www.researchgate.net/publication/349282028\\_Oil\\_Spill\\_Modeling\\_A\\_Critical\\_Review\\_on\\_Current\\_Trends\\_Perspectives\\_and\\_Challenges](https://www.researchgate.net/publication/349282028_Oil_Spill_Modeling_A_Critical_Review_on_Current_Trends_Perspectives_and_Challenges) (accessed: 03.05.2023).
11. Zhao, L. Evolution of bubble size distribution from gas blowout in shallow water. / Zhao, L.; Boufadel, M.C.; Lee, K.; King, T.; Loney, N.; Geng, X. – Text: electronic // Journal of Geophysical Research: Oceans – 2016. – 121, – p. 1573-1599, URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2015JC011403> (accessed: 03.05.2023).
12. Muddassir Nazir. Multimedia Fate of Oil Spills in a Marine Environment – An Integrated Modelling Approach. / Muddassir Nazir, Faisal Khan, Paul Amyotte, Rehan Sadiq. – DOI:10.1016/j.psep.2007.10.002. – Text: electronic // Process Safety and Environmental Protection. – 2008. – 86 (2). URL: [https://www.researchgate.net/publication/44093455\\_Multimedia\\_Fate\\_of\\_Oil\\_Spills\\_in\\_a\\_Marine\\_Environment\\_-\\_An\\_Integrated\\_Modelling\\_Approach](https://www.researchgate.net/publication/44093455_Multimedia_Fate_of_Oil_Spills_in_a_Marine_Environment_-_An_Integrated_Modelling_Approach) (accessed: 03.05.2023).
13. Abdolali, A. Numerical Modeling of the Spreading and Evaporation of Oil Spills on Water. / A. Abdolali, A. Muhammad, K. Mukarami. // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2012. – 81. pp. 86-96.
14. Batmanov, S.V. Review of experimental studies on emergency oil product spills / S.V. Batmanov, M.R. Samokhin, S.P. Sukharsky, V.A. Tishchenko, T.A. Tishchenko. – Text : electronic // Fires and emergencies. -2019. – No. 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-eksperimentalnyh-issledovaniy-po-avariynym-prolivam-nefteproduktov> (accessed: 05/04/2023).

15. Pivovarov, A.T. Environmental problems of the use of petroleum products / A.T. Pivovarov, Yu.B. Salina. – Text : electronic // Oil and gas technologies and environmental safety. - 2007. – No.6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskie-problemy-primeneniya-nefteproduktov> (accessed: 05/04/2023).

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Шильникова Екатерина Андреевна**, аспирант, Сибирский государственный университет водного транспорта, 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: [e.a.shilnikova@nsawt.ru](mailto:e.a.shilnikova@nsawt.ru)

**Рослякова Оксана Вячеславовна**, к.т.н, доцент, заведующий кафедры Техносферной безопасности, Сибирский государственный университет водного транспорта, 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: [o.v.roslyakova@nsawt.ru](mailto:o.v.roslyakova@nsawt.ru)

**Ekaterina A. Shilnikova**, postgraduate student, Siberian State University of Water Transport, 630099, Novosibirsk, Shchetinkina str., 33, e-mail: [e.a.shilnikova@nsawt.ru](mailto:e.a.shilnikova@nsawt.ru)

**Oksana O. Roslyakova**, Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Technosphere Safety Department, Siberian State University of Water Transport, 630099, Novosibirsk, Shchetinkina str., 33, e-mail: [o.v.roslyakova@nsawt.ru](mailto:o.v.roslyakova@nsawt.ru)

Статья поступила в редакцию 07.05.2023; опубликована онлайн 20.06.2023.  
Received 07.05.2023; published online 20.06.2023.

**Научные проблемы  
водного транспорта**

**Russian Journal of Water  
Transport**

**№75(2), 2023**

Формат бумаги 70x180 1/16. Бумага офсетная.  
Ризография. Усл. печ. л. 14,94. Уч.-изд. л. 20,91.  
Заказ 077. 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 издательско-полиграфического комплекса ФГБОУ ВО «ВГУВТ». Адрес 603951, Российская Федерация, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

Свободная цена

Подписной индекс в каталоге  
Агентства "Книга-Сервис"  
70191

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)  
Свидетельство ПИ № ФС77-77658 от 17 января 2020 г.

*Адрес редакции и издателя:*  
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, д.5

*Управление научных исследований  
и инновационной деятельности  
© ВГУВТ, 30.06.2023*

Научные проблемы водного транспорта № 75 (2) 2023