



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

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

# Научные проблемы водного транспорта

№71 (2) 2022

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
- 05.22.19 Эксплуатация водного транспорта, судовождение
- 08.00.05 Экономика и управление (по отраслям)

▪ 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: [raeva@vsawt.com](mailto:raeva@vsawt.com) ( 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**

Минеев Валерий Иванович, д.э.н., профессор, советник при ректорате, Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

Корнев Андрей Борисович, к.т.н., доцент, проректор по научной работе, 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;

Волков Иван Андреевич, д.ф.-м.н., профессор, Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия;

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

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

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

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

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

Иванов Валерий Михайлович, к.т.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;

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;

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;

Мареев Евгений Анатольевич, д.ф.-м.н., профессор, член-корр. 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;

Мордовченков Николай Васильевич, д.э.н. профессор, Княгининский университет, г. Нижний Новгород, Россия;

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

Озина Альбина Михайловна, д.э.н., профессор, Нижегородский институт управления Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, г. Нижний Новгород, Россия;

Отделкин Николай Станиславович, д.т.н., профессор, Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия;

Роннов Евгений Павлович, д.т.н., профессор, Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, 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 Федорович, д.э.н., профессор, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия;

Уметалиев Акылбек Сапарбекович, д.э.н., профессор, Кыргызский государственный технический университет им. И. Разакова, 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;

#### **Редакционный совет**

Алексеев В.Я., Генеральный директор ОАО «Порт Коломна», г. Коломна, Россия;

Бессмертный Д.Э., к.т.н. Руководитель ФБУ «Администрация волжского бассейна», Нижний Новгород, Россия;

Ежов П.В., Генеральный директор ООО «Си Тех», Нижний Новгород, Россия;

Ефремов Н.А., д.э.н., Первый заместитель генерального директора ФАУ Российский речной регистр, Москва, Россия;

Мочалина Н.Н., Первый заместитель министра - начальник управления природопользования Министерства экологии и природных ресурсов Нижегородской области, Нижний Новгород, Россия;

Столповицкий К.С., начальник Управления государственного морского и речного надзора Ространснадзора, Москва, Россия;

Сазонов И.Г., заместитель Министра промышленности Нижегородской области, Нижний Новгород, Россия;

Теодор де Йонге, Генеральный директор "Numeerieck Centrum Groningen B.V.", Гронинген, Нидерланды;

Франк Венде - профессор, к.т.н., Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Магдебург, Германия; Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, г. Москва, Россия;

Шаталов В.В., профессор, Генеральный директор ОАО КБ "Вымпел", Нижний Новгород, Россия.



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

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

# Russian Journal of Water Transport №71 (2) 2022

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
- 05.22.19 Operation of water transport, navigation
- 08.00.05 Economics and management (in different industry areas)

▪ 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: [raeva@vsawt.com](mailto:raeva@vsawt.com) (or through the magazine's website <http://journal.vsuwt.ru/>)

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

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

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

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

## Editorial Team

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

**Editor In chief deputy:** Valeriy.I. Mineev, Dr. Sci. (Econ.), professor, Volga state unuversity of water transport, Nizhny Novgorod, Russia

**Editor In chief deputy:** Andrey B. Kornev, Dr. Sci. (Tech.), Volga state unuversity of water transport, Nizhny Novgorod, Russia

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

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

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

## Editorial board

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

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

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

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

Ivan A. Volkov, Dr. Sci. (Phys-Math.), professor, Volga state unuversity of water transport, 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;

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

Valeriy M. Ivanov, Cand. Sci. (Tech.), professor, Volga state unuversity of water transport, Nizhny Novgorod, Russia;

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

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;

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

Yelena A. Lavrentyeva., Dr. Sci. (Econ.), professor, FSBEE H.Ed. SUMRF named after admiral Makarov, St.-Petersburg, Russia;

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

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

Nikolay V. Mordvichenkov, Dr. Sci. (Econ.), professor, FSBEE H.Ed, Nizhny Novgorod, Russia;

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

Al'bina M. Ozina, Dr. Sci. (Econ.) Dr., professor, Russian academy of national economy and public service under the President of Russian Federation, Moscow, Russia;

Nikolay S. Otdelkin, Dr. Sci. (Tech.), professor, Volga state university of water transport, Nizhny Novgorod, Russia;

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

### **Editorial Council**

Alekseyev V.Ju., General Manager of public corporation “Port of Kolomna”, Kolomna, Russia;  
Bessmertny D.E., Cand. Scs. (Tech.), Manager of “Federal budgetary institution of the Volga basin”, Nizhny Novgorod, Russia;

Ezhov P.V., General manager of LLC “Sea Tech”, Nizhny Novgorod, Russia;

Efremov N.A., Dr. Sci. (Econ.) First deputy of general manager of Russian river register, Moscow, Russia;

Mochalina N.N., First deputy minister- chief of dept of natural resources use of ministry of Ecology and natural resources of Nizhny Novgorod Region, Nizhny Novgorod, Russia;

Stolpovitsky K.S., chief of marine and river state inspection department of Rostransnador, Moscow, Russia;

Sazonov I.G., deputy minister of Industry of Nizhny Novgorod Region, Nizhny Novgorod, Russia;

Shatalov V.V., professor, General manager OAO KB “Vimpel”, Nizhny Novgorod, Russia.

Teodore de Yonge, General Director of “Numeriek Centrum Groningen BV”, Groningen, Netherlands;

Frank Wende, PhD, professor, Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und - automatisierung IFF, Magdeburg, Germany.





## **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**

<b>С.Н. Гирин, Ю.И. Матвеев</b> Анализ поломки гребного вала теплохода «ЭЛАНД».....	15
<b>И.А. Гуляев, Е.П. Роннов, Ю.А. Кочнев</b> Оптимизация комбинированного судна типа танкер/площадка на основе имитационного моделирования.....	29
<b>А.А. Зорин, Д.А. Миролубов, В.В. Кузнецова</b> Многокритериальная оптимизация судовых устройств и их элементов .....	46
<b>О.А. Иванова, А.В. Родькина</b> Методика оценки рисков на стадии концептуального проектирования объектов морской техники при обустройстве морских месторождений .....	54
<b>А.Г. Назаров</b> Проблемы совершенствования подходов к конструктивной противопожарной защите судов из композиционных материалов .....	74

## **Эксплуатация судового энергетического оборудования**

<b>О.П. Шураев, Д.И. Бевза</b> Котел-утилизатор в составе многоцелевого испытательного стенда на базе двигателя 2Ч 10.5/13.....	85
--	----

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

<b>С.Д. Гордлеев, О.Л. Трухинова, В.И. Тихонов</b> Критериальный подход в оптимизации параметров хаусботов как аспект инвестиционного выбора .....	98
<b>Е.С. Жендарева, Е.С. Кадникова, А.В. Гюнтер</b> Организация взаимодействия различных видов транспорта в производственно-транспортных процессах добычи и доставки нерудных строительных материалов ..	110
<b>В.И. Минеев, О.В. Почакаева, В.М. Иванов</b> Проблемы эффективного функционирования Единой глубоководной системы европейской части России .....	122
<b>Н.В. Пумбрасова, Е.В. Упадышева</b> Инновации в экономическом развитии речного туризма как основа мультипликативного эффекта в развитии малых городов .....	133
<b>А.В. Юлова, А.О. Ничипорук</b> Методика расчета эксплуатационных расходов для судна на воздушной подушке, используемого при социальных региональных перевозках .....	147

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

<b>В.А. Лобанов</b> САЕ-исследования аэродинамики речных льдов .....	159
<b>С.Н. Масленников, М.Г. Сеницын</b> Инновационные технологии подготовки специалистов по управлению на речном транспорте .....	169
<b>А.Ю. Платов, Ю.И. Платов</b> Концепция системы оперативного планирования отправления грузов из портов на внутренних водных путях .....	180
<b>В.П. Умрихин</b> Определение параметров качки судна в эксплуатационном рейсе .....	188

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

<b>В.В. Агеева, Е.А. Люкина, М.А. Матюгин</b> Мероприятия по снижению негативного воздействия на гидрологические и судоходные условия реки при разработке руслового карьера выправительными сооружениями .....	199
<b>Ю.И. Бик, М.А. Бучельников, В.Н. Кофеева, В.А. Бобыльская</b> Оценка техногенной нагрузки по интенсивности дноуглубительных работ на перекатных участках реки Обь .....	213
<b>И.В. Липатов, О.Л. Домнина, Д.А. Бандин</b> Особенности численного моделирования речных потоков при анализе последствий аварий судов .....	225

## **Техносферная безопасность**

<b>О.Л. Домнина, И.В. Липатов</b> Моделирование процессов распространения загрязнения при аварии сухогрузных судов .....	239
<b>С.А. Казьмин, А.В. Лобанов, О.Я. Тимофеев</b> Обзор средств океанотехники морского ветроэнергетического сектора .....	253
<b>В.С. Наумов, И.Б. Кочнева</b> Совершенствование экологической маркировки судов .....	268

# CONTENTS

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

***Stanislav N. Girin, Yuri I. Matveev***

Analysis of the failure of the propeller shaft of the motor ship «ELAND» ..... 15

***Ilya A. Gulyaev, Yuri A. Kochnev, Evgeniy P. Ronnov***

Optimization of a combined tanker/platform type vessel based on simulation modeling..... 29

***Alexander A. Zorin, Dmitry A. Mirolyubov, Vera V. Kuznetsova***

Multicriteria optimization of ship devices and their elements ..... 46

***Olga A. Ivanova, Anna V. Rodkina***

Methodology for risk assessment at the conceptual design stage of offshore structures during the offshore fields development ..... 54

***Albert G. Nazarov***

Problems of improvement of approaches to structural fire protection of ships in composite materials ..... 74

## ***Operation of ship power equipment***

***Oleg P. Shurayev, Denis I. Bevza***

A heat recovery boiler as part of a multi-purpose research bench based on an engine 2CH 10.5/13..... 85

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

***Sergei D. Gordleev, Olga L. Trukhinova, Vadim I. Tikhonov***

Criterion approach in optimization of houseboat parameters as an aspect of investment choice ..... 98

***Elena S. Zhendarev, Elena S. Kadnikov, Alexey V. Giunter***

Organization of interaction of various modes of transport in the production and transport processes of production and delivery of non-metallic construction materials ..... 110

***Valery I. Mineev, Olga V. Pochekaeva, Valery M. Ivanov***

Problems of effective functioning of the Unified deep-water system of the European part of Russia ..... 122

***Natalya V. Pumbrasova, Elena V. Upadysheva***

Innovations in the economic development of river tourism as the basis of the multiplier effect in the development of small towns ..... 133

***Anastasia V. Yulova, Andrey O. Nichiporuk***

Operating cost calculation methodology for hovercraft used in social regional transportation ..... 147

## ***Operation of water transport, navigation and safety of navigation***

<b><i>Vasily A. Lobanov</i></b> CAE studies of river ice cover aerodynamics .....	159
<b><i>Sergey N. Maslennikov, Mikhail G. Sinitsyn</i></b> Innovative technologies for training specialists in river transport management .....	169
<b><i>Alexander J. Platov, Juri I. Platov</i></b> The concept of the operational planning system for the departure of goods from ports on inland waterways .....	180
<b><i>Viktor P. Umrikhin</i></b> Determination of the ship's pitching parameters during an operational voyage .....	188

## ***Waterways, ports and hydraulic engineering constructions***

<b><i>Vera V. Ageeva, Ekaterina A. Lyukina, Mikhail A. Matyugin</i></b> Measures to reduce the negative impact on the hydrological and navigational conditions of the river during the development of a channel quarry by correctional facilities .....	199
<b><i>Yuriy I. Bic, Mikhail A. Buchelnikov, Vera N. Kofeeva, Viktoria A. Bobylskaya</i></b> Assessment of the technogenic load by the intensity of dredging operations on the rolling sections of the Ob River .....	213
<b><i>Igor V. Lipatov, Olga L. Domnina, Denis A. Bandin</i></b> Peculiarities of numerical simulation of river flows in analyzing the consequences of ship accidents .....	225

## ***Technosphere safety***

<b><i>Olga L. Domnina, Igor V. Lipatov</i></b> Modeling of pollution propagation processes during dry cargo ship accidents .....	239
<b><i>Sergey A. Kazmin, Aleksey V. Lobanov, Oleg Ya. Timofeev</i></b> Overview of ocean technology of the wind energy sector .....	253
<b><i>Victor S. Naumov, Irina B. Kochneva</i></b> Improvement of environmental labels of ships .....	268

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

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

УДК 629.12

DOI: 10.37890/jwt.vi71.248

#### **Анализ поломки гребного вала теплохода «ЭЛАНД»**

**С.Н. Гирин<sup>1</sup>**

**Ю.И. Матвеев<sup>1</sup>**

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

**Аннотация.** Рассматривается авария, связанная с разрушением гребного вала танкера «ЭЛАНД», произошедшая в Ладожском озере вскоре после выполнения работ на одном из судоремонтных заводов в рамках очередного освидетельствования. На основе материалов, предоставленных авторам как независимым экспертам, арбитражным судом показано, что причиной поломки гребного вала явились нарушения технологии проведения работ на заводе. Вследствие чрезмерного смещения оси кронштейна относительно дейдвуда в материале вала возникли значительные нормальные напряжения, которые вызвали малоцикловое нарушение усталостной прочности. Показано, что в правилах Российского морского регистра судоходства и Российского Речного Регистра отсутствуют требования по проверке прочности судовых валов по нормальным напряжениям, что, по мнению авторов, является недостатком правил.

**Ключевые слова:** гребной вал, поломка, центровка, нормальные напряжения, усталостная прочность, правила Российского Речного Регистра, правила Российского морского регистра судоходства, нормирование прочности.

#### **Analysis of the motor ship «ELAND» propeller shaft failure**

**Stanislav N. Girin<sup>1</sup>**

**Yuri I. Matveev<sup>1</sup>**

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

**Abstract.** The article considers an accident associated with the destruction of the tanker "ELAND" propeller shaft, which occurred in Lake Ladoga shortly after the work was completed at one of the shipyards as part of the regular survey. On the basis of the materials provided to the authors as independent experts, the arbitration court showed that the reason for the failure of the propeller shaft was violations of the work technology at the plant. Due to the excessive displacement of the bracket axis relatively the deadwood, significant normal stresses arose in the shaft material, which caused a low-cycle violation of the fatigue strength. It is shown that the rules of the Russian Maritime Register of Shipping and the Russian River Register do not contain requirements for checking the strength of ship shafts under normal stresses, which, according to the authors, is a drawback of the rules.

**Keywords:** propeller shaft, breakage, centering, normal stresses, fatigue strength, rules of the Russian River Register, rules of the Russian Maritime Register of Shipping, strength rating.

### **Введение**

В 2021 г авторы настоящей статьи были привлечены арбитражным судом в качестве независимых экспертов для выяснения причин аварии, произошедшей с т/х «ЭЛАНД». Экспертам были предоставлены все документы, имеющиеся в распоряжении суда.

Из материалов дела:

«02.11.2019 т/х «Эланд» стоял у причала СВ-7 порта Санкт-Петербург. В 01:00 МВ (по местному времени) судно отошло от причала с лоцманом на борту и последовало вверх по р. Нева в разводку мостов по направлению в порт Ярославль. В 04:01 МВ лоцман покинул борт судна, далее т/х «Эланд» продолжил движение по р. Нева самостоятельно под руководством экипажа.

В 10:35 МВ судно вышло из закрытого участка «Ивановские пороги» в Ладожское озеро.

(Прогноз погоды от 06:00/02.11.19 до 18:00/02.11.19 по Ладожскому Озеру. Прогноз погоды штормовой. Ветер Юго-Восток, Южный, 5-10 м/с, во второй половине срока порывы 12-14 м/с. Высота волн в 1-4 р-нах 0,5-1,0 м, 2 район 0,5-1,0 м, во второй половине срока 0,7-1,2 м, в 3-5 р-нах 0,5-1,0 м, во второй половине срока 1,0-1,5 м. Снег, мокрый снег. Видимость 4-8 км, в осадках временами до 1-2 км. 02.11.19 г, начиная с 12:00-15:00, рождается усиление Юго-Восточного ветра 12-16 м/с. Максимальная высота волны 1,3-1,8 м. Петербург погода. Диспетчер Блинова)

В 13:45 МВ экипаж судна зафиксировал нехарактерные удары по корпусу в районе винта винторулевого комплекса по левому борту. После этого повысились обороты на левом ГД до 400 об/мин.

Главный двигатель был остановлен, экипаж приступил к осмотру судна на наличие повреждений. В машинном помещении было обнаружено сильное поступление забортной воды через дейдвудный сальник ЛБ. Силами экипажа течь была ликвидирована. Капитаном было принято решение о возвращении. При развороте судна на обратный курс было обнаружено периодическое заклинивание рулевого устройства при перекладке руля более чем на 10 град.

В 21:15 МВ судно своим ходом прибыло на рейд в районе Бугровского буя и встало на *якорь* в ожидании дальнейших указаний».

18 ноября 2019 г судно т/х «Эланд» было поднято на слип одного из судоремонтных заводов с целью дефектации гребного вала и выяснения причин транспортного происшествия.

Результаты осмотра и дефектации, выполненные специалистами этого завода и привлеченными экспертами, отражены в материалах дела, при этом отмечается следующее:

- гребной вал левого борта выдвинут из дейдвудной трубы и упирается верхней лопастью в перо руля ЛБ при этом на валу отсутствуют видимые деформации в форме остаточного изгиба (см. рис. 1);



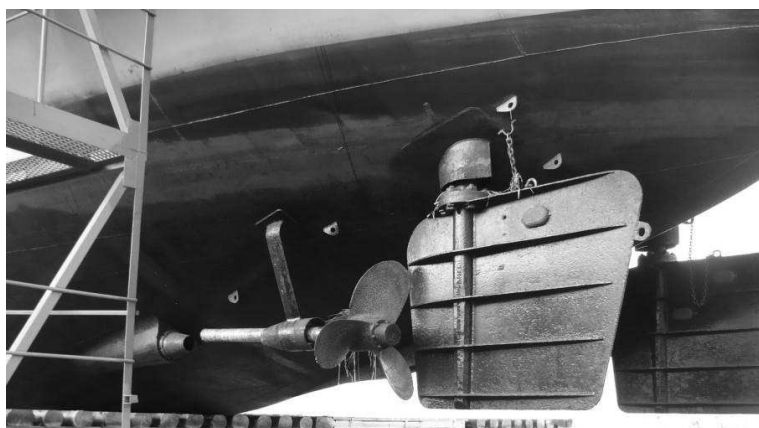


Рис. 1. Фотография кормовой оконечности судна после аварии  
(из материалов судебного дела)

- гребной вал ЛБ имеет поперечный излом в зоне сопряжения участков вала с различными диаметрами (зона расположения галтели) в районе выхода вала из кормового подшипника дейдвуда (см. рис. 2);



Рис. 2. Фотография кормовой части гребного вала в районе разрушения  
(из материалов судебного дела)

- рабочая поверхность бронзовой облицовки гребного вала ЛБ выносного концевой подшипника имеет ярко выраженные натирки по краям шириной до 40 мм (см. рис. 3);
- следов контакта подводной части корпуса судна и пера руля левого борта с внешними объектами не обнаружено;

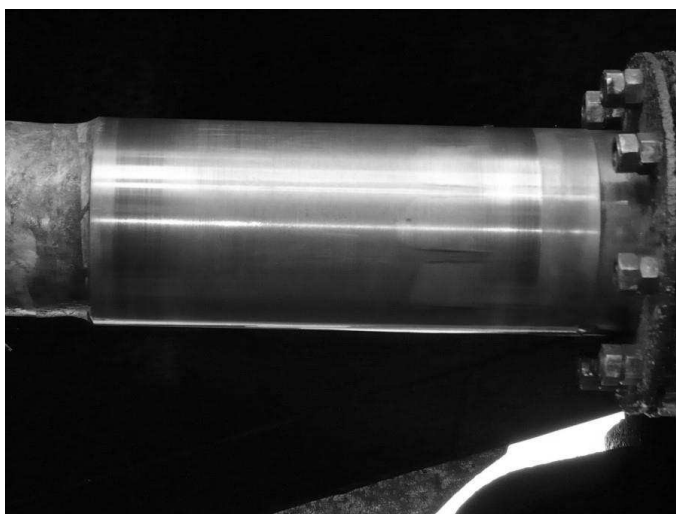


Рис. 3. Фотография участка гребного вала в районе выносного концевой подшипника (из материалов судебного дела)

- лопасти винта ЛБ (3 шт) имеют следы контакта с посторонними объектами в виде зазубрин и забоин на каждой глубиной до 10-15 мм;
- монтажный носовой рым пера руля загнут на правый борт под углом 45-60° без явных следов внешнего динамического воздействия (см. рис. 4);

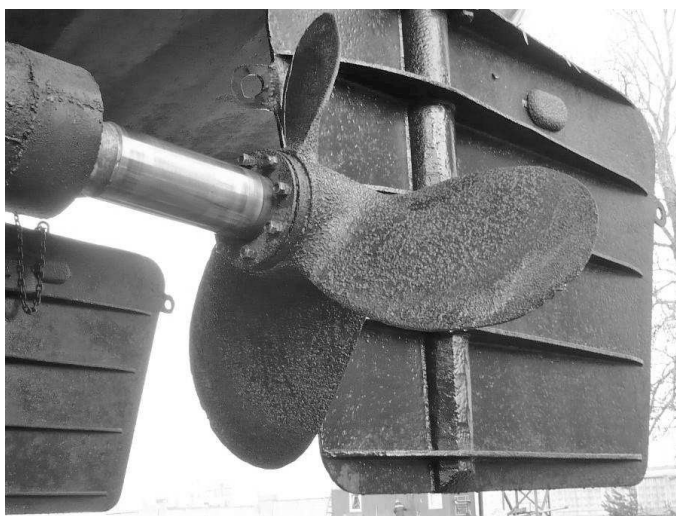


Рис. 4. Фотография, показывающая взаимное положение лопасти винта и рыма пера руля после разрушения и выхода вала из дейдвудного подшипника и подшипника кронштейна (из материалов судебного дела)

- перо руля ЛБ имеет вмятину в носовой части по ДП в месте упора лопасти винта в районе носового рыма длиной до 100-150 мм со стрелкой прогиба до 5-8 мм;

- корпус судна по поверхности между кормовой частью дейдвудов и кронштейнами в районе 7 шп. имеет излом в виде поперечной с борта на борт «гофры». Максимальная глубина деформации составляет 19 мм;
- подпалубные продольные балки цистерны (от носовой стенки цистерны 7 шп. до 0 шп.) имеют деформацию на провисание со стрелой прогиба до 100 мм. Подпалубный поперечный набор (бимс) в р-не 3 шп. по ПБ и ЛБ имеют деформацию на изгиб со сдвигом оси полки до 50 мм и стрелкой прогиба до 40 мм на длину 1,0 м. Полки рамного набора деформированы;
- в капролоновом подшипнике кронштейна отверстие выполнено со смещением от центра оси на 5 мм;
- Смещение оси кронштейна относительно дейдвуда по вертикали на 19,5 мм на ПрБ и 18,0 мм на ЛБ.

### **1. Предмет судебного разбирательства**

За несколько дней до описанного транспортного происшествия т/х «ЭЛАНД» был куплен у прежнего судовладельца одной из судоходных компаний. В договоре купли-продажи было прописано условие возмещения издержек прежним судовладельцем, возникших в результате проявления скрытых дефектов. Случившееся разрушение гребного вала новый судовладелец отнес к скрытым дефектам вала и потребовал возмещения расходов на его устранение. Прежний судовладелец оспорил вмененный иск, представив в суд акты выполненных на одном из судоремонтных предприятий работ в рамках очередного освидетельствования судна в соответствии с регламентом Российского Речного Регистра, под надзором которого находится судно, а также заключения некоторых экспертов.

### **2. Анализ документации по работам, выполненным в рамках очередного освидетельствования судна**

Некоторыми экспертами, которые были привлечены ответчиком для исследования причин поломки гребного вала, было высказано предположение о том, что причиной поломки мог быть удар винта о подводное препятствие. Представленные выше фотоматериалы опровергают данное предположение, поскольку при ударе винтом о подводный предмет, вызвавшем поломку вала, лопасти винта должны были неизбежно получить значительные деформации, которые отсутствуют на самом деле; отсутствуют также изгибные деформации гребного вала, а также упоров (раскосов) кронштейна. Значительные натирывы с изменением цвета бронзовой облицовки вала в районе подшипника кронштейна свидетельствуют о повышенной температуре подшипника, вызванной силами трения вала о подшипник, которые, в свою очередь, вызваны существенной поперечной реакцией взаимодействия вала с подшипником. Таким образом, причины поломки следует искать в технологии установки и центровки валопровода, примененной на судоремонтном заводе при проведении работ в рамках очередного освидетельствования.

В соответствии с п.2.3.1 Правил освидетельствования судов в процессе их эксплуатации (ПОСЭ) Российского Речного Регистра [1] очередное освидетельствование производится с целью определения технического состояния элементов судна и судовых технических средств, возобновления класса и оформления нового свидетельства о классификации, свидетельства о предотвращении загрязнения окружающей среды с судна и включает в себя в том числе освидетельствование

подводной части судна в доке (на слипе) или на берегу. В соответствии с п.2.3.2 очередное освидетельствование производится один раз в пять лет.

В феврале 2019 г судно т/х «ЭЛАНД» своим ходом прибыло на один из судоремонтных заводов для выполнения очередного освидетельствования; при этом оно имело заключение со стороны Российского Речного Регистра о годном состоянии корпуса.

Произведенная компетентной организацией дефектация корпуса выявила незначительные дефекты в наружной обшивке, а также износы обшивки и основных связей корпуса, не превышающие допустимых значений по Правилам Российского Речного Регистра, что отражено в соответствующем акте.

На основании выполненной дефектации экспертом Российского Речного Регистра 04.04.2019 г сделано заключение о том, что техническое состояние корпусных конструкций признается как годное.

После этого судно было поставлено в док для выполнения работ по дефектации и ремонта рулей, гребных винтов и валов.

В ведомость-смете перечислены работы по дефектации и ремонту гребных валов, которые предполагали демонтаж гребных валов в сборе, обмеры, дефектацию и дефектоскопию валов в цехе, проверку биения и шлифовку поверхностей шеек. Предполагались также дефектация и обмер дейдвудных втулок и подшипников в консолях.

Все запланированные работы по дефектации и ремонту гребных валов были выполнены.

После монтажа валопровода и перед выходом судна из дока было выполнено контрольное проворачивание валопроводов с оформлением извещений о вызове эксперта Российского Речного Регистра. Замечания по результатам проворачивания валопроводов не были выявлены.

После завершения работ, связанных с ремонтом валопроводов, была выполнена прострожка и заварка сварных швов днищевой обшивки в районе машинного отделения в объеме 73 погонных метров, что потребовало перестановки нескольких опорных тумб.

29 апреля 2019 г судно было выведено из дока. После выхода судна из дока для проверки центровки валовых линий судно по требованию судовладельца было забалластировано в соответствии с правилами РРР. В результате испытаний было выявлено, что валовые линии левого борта перестали вращаться. Следует отметить, что испытания проводились без вызова эксперта Российского Речного Регистра, что является грубым нарушением требований Правил Речного Регистра.

В техническом акте завода от 22.05.2019 отмечается «По причине заклинивания гребного вала Л.Б произведена повторная докировка судна в док. В доке произведены замеры зазоров дейдвудных подшипников Пр.Б. с использованием щупов. Обнаружена несоосность дейдвудных подшипников с подшипником кронштейна. (Подшипник кронштейна опущен вниз примерно на 10 мм)». Далее приводится перечень последующих работ.

В ходе дефектации обнаружено биение вала, произведена его правка и проточка облицовок. В ходе ремонтных работ предполагается изготовить и установить новую втулку кронштейна с осевым смещением.

После завершения ремонтных работ, укладки отремонтированных валов и их центровки судно было спущено на воду, произведены швартовные и ходовые испытания, подписаны документы Российского Речного Регистра, свидетельствующие о годности судна к эксплуатации. При этом обращает на себя внимание, что в актах отсутствуют сведения о характере нагружения корпуса судна, т.е. при каких условиях выполнялись указанные виды испытаний. В представленных

суду документах отсутствует информация о расследовании причин, вызвавших заклинивание валопровода левого борта, что вызывает удивление.

Попытаемся разобраться в этих причинах сами на основании имеющихся в нашем распоряжении документов.

Прежде всего, хочется отметить, что в соответствии с ОСТ 5.4368-81[2] центровка валопровода должна выполняться только при положении судна на плаву при водоизмещении не менее 85% от водоизмещения порожнем. В ряде случаев должны приниматься во внимание рекомендации по проверке параметров центровки, а при необходимости и их корректировка в условиях принятия на судно балласта или груза. В доке допускается выполнять центровку только при наличии достоверных (практически подтвержденных) данных по изменению параметров центровки в связи со спуском судна на воду с целью упреждающего учета указанных изменений. После спуска на воду центровку следует проводить после отстоя судна на плаву не менее, чем в течение двух-трех суток.

Все эти положения заводом были нарушены.

Выше отмечалось, что в ходе дефектации после повторной докировки судна было замечено опущение подшипника кронштейна вниз примерно на 10 мм. Заводом было принято странное решение о замене капролоновой втулки кронштейна новой втулкой и сверление ее со смещением осевой линии на 5 мм от оси кронштейна.

В процессе дефектации после аварии, как было отмечено выше, было зафиксировано смещение оси кронштейна относительно дейдвуда по вертикали на 19,5 мм на ПрБ и 18,0 мм на ЛБ. При этом также отмечалось, что подпалубные продольные балки цистерны (от носовой стенки цистерны 7 шп. до 0 шп.) имеют деформацию на провисание со стрелой прогиба до 100 мм; подпалубный поперечный набор (бимс) в р-не 3 шп. по ПБ и ЛБ имеют деформацию на изгиб со сдвигом оси полки до 50 мм и стрелкой прогиба до 40 мм на длину 1,0 м; полки рамного набора деформированы.

Откуда же возникли эти деформации, если в ходе дефектации корпуса перед постановкой судна в док они не были выявлены, и в чем причина заклинивания валопровода после спуска судна на воду?

Ответ на эти вопросы можно найти в изложенной выше фразе: «после завершения работ, связанных с ремонтом валопроводов, была выполнена прострожка и заварка сварных швов днищевой обшивки в районе машинного отделения в объеме 73 погонных метров, что потребовало перестановки нескольких опорных тумб».

Т/х «ЭЛАНД» является танкером класса «М-ПР 2,5» Российского Речного Регистра, его главные размерения: длина  $L = 79,9$  м; ширина  $B = 11,28$  м; высота борта  $H = 3,5$  м. Танкеры внутреннего и смешанного плавания являются довольно гибкими судами, максимальная стрелка общего изгиба у них достигает десятков и сотен миллиметров, поэтому перед постановкой в док необходимо выполнить измерение упругой линии корпуса. С учетом этих измерений выставляются тумбы (клетки) для выравнивания реактивных усилий с их стороны на корпус; тумбы устанавливаются под поперечными переборками. Корпус танкера в состоянии «порожнем» имеет перегиб, поэтому, если не учитывать упругую линию корпуса, концевые тумбы будут испытывать повышенную нагрузку. Как видно из рис.5, некоторые из тумб должны устанавливаться под переборкой 7 шп. Очевидно, что эти тумбы создают повышенную нагрузку на переборку. Если, как указано выше, часть тумб в районе машинного отделения убиралась для прострожки и последующей заварки сварных швов, то это увеличило нагрузку на переборку 7 шп., и она потеряла устойчивость, что повлекло за собой пластическую деформацию подпалубного набора. Это предположение подтверждается отмеченным в ходе дефектации после аварии фактом: «Корпус судна по поверхности между кормовой частью дейдвудов и

кронштейнами в районе 7 шп. имеет излом в виде поперечной с борта на борт «гофры». Максимальная глубина деформации составляет 19 мм».

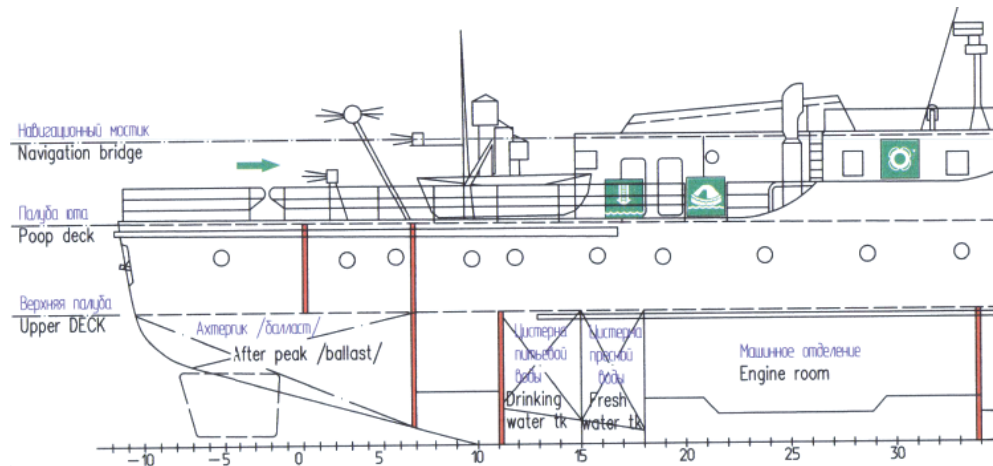


Рис. 5. Схема кормовой оконечности т/х «ЭЛАНД»

Потеря устойчивости поперечной переборки резко снизила жесткость кормовой оконечности судна. Если смещение оси капролоновой втулки подшипника кронштейна на 5 мм позволило компенсировать упругие деформации корпуса судна в состоянии «порожнем» на тихой воде, то при ходе в балласте на волне высотой 1,3 – 1,8 м оно не компенсировало значительное смещение вниз кормовой оконечности в районе кронштейна винта.

### 3. Анализ напряженного состояния валопровода при смещении оси подшипника кронштейна

Для оценки напряжений, возникающих в гребном вале, при смещении оси подшипника кронштейна был выполнен расчет вала с использованием программы для ЭВМ «РАМ», имеющей сертификат Российского Речного Регистра об одобрении компьютерного приложения №15.20.099.538234 от 10.01.2020 г.

Расчетная схема вала, показанная на рис.1, выполнена на основе чертежа № 2019-ТУ-3-100А-001 «Вал гребной». Вал изготовлен из поковки КМ-28А в соответствии с ГОСТ 8536-79. Диаметры гребного вала и промежуточного вала равны 140 мм. Предел текучести материала  $R_{сН}$  составляет 280 МПа, а предел прочности  $R_m=540$  МПа.

На рис. 6 опоры 1 и 2 соответствуют кормовой и носовой кромкам подшипника кронштейна; опоры 3 и 4 – аналогичным кромкам дейдвудного подшипника (точнее говоря, двух подшипников); опоры 5 и 6 - кромкам промежуточного подшипника.

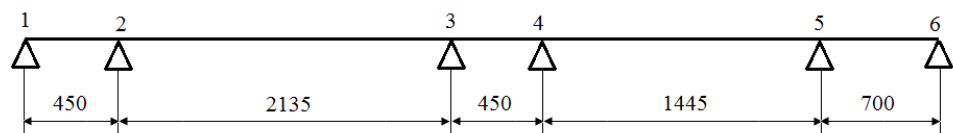


Рис. 6. Расчетная схема валопровода т/х «ЭЛАНД»

Выше было показано, что в результате дефектации после аварии было зафиксировано смещение оси кронштейна относительно оси дейдвуда по левому

борту 18,0 мм, однако при повторном монтаже валопровода втулка капролонового подшипника была пересверлена со смещением от центра на 5 мм. Таким образом, будем считать, что имело место смещение на 12 мм. При таком смещении расчет по программе «RAM» показывает, что максимальные нормальные напряжения 158 МПа возникают в сечении по 3 опоре. Величина максимальной реакции возникает на опорах 1 и 2 и составляет 140 кН.

Разрушение гребного вала произошло по сечению выхода из кормового подшипника дейдвуда по галтели (см. рис.2), следовательно, в этом сечении имела место концентрация напряжений. Из чертежа вала следует, что радиус галтели составляет 10 мм. В соответствии с табл. 14.2 справочного пособия [3] принимаем коэффициент концентрации напряжений равным 1,80.

В соответствии с формулой (16) справочника [4] уравнение кривой усталости при мягком нагружении имеет вид

$$\sigma N^{0,08} = \sigma_B N_B^{0,08} \quad (1)$$

где величину  $N_B$  рекомендуется принимать равной 10.

Логарифмируя это равенство, найдем число циклов до разрушения

$$\lg(N) = \frac{1}{0,08} \lg\left(1,20 \frac{\sigma_B}{\sigma}\right) = \frac{1}{0,08} \lg\left(1,20 \frac{540}{1,8 \cdot 158}\right) = 4,47; N \approx 10^5.$$

Номинальная частота вращения коленчатого вала двигателя составляет  $5,8 \text{ с}^{-1}$ . За 10 часов хода напряжение материала вала испытало примерно 180 тысяч циклов, что вполне достаточно для усталостного разрушения материала вала при указанных амплитудах напряжений.

На фото рисунка 2 видно, что разрушение произошло по сечению нормальному оси вала, при этом характер поверхности разлома соответствует малоцикловому разрушению, поскольку при многоцикловом разрушении зерна вблизи поверхности были бы сглажены.

Фотография рисунка 3 показывает, что на бронзовой облицовке консольного подшипника видны достаточно узкие полоски изменения цвета. Это объясняется местным нагревом облицовок при трении, вызванном реакциями  $R_1$  и  $R_2$ , которые достигают 140 кН.

#### **4. Анализ требований морского и речного регистров в части нормирования прочности судовых валопроводов**

В правилах Российского морского регистра судоходства [5], а также в правилах Российского Речного Регистра [6] приведены зависимости для определения диаметров валов валопровода в зависимости от мощности и числа оборотов главного двигателя, а также приводятся рекомендации по установлению расстояний между подшипниками. При этом какие-либо указания на методики проверки прочности валопровода в правилах отсутствуют; нет и нормативных значений допускаемых напряжений.



Рис. 7. Трещины гребного вала под вскрытой изоляцией



Рис. 8. Трещина вала судна пр.1577 типа «Волгонефть»



Рис. 9. Глубокая трещина – разрушение гребного вала



В правилах [5] и [6] нормируются лишь касательные напряжения, вызванные крутильными колебаниями.

Крутильные колебания, безусловно, представляют опасность с точки зрения усталостной прочности судовых валов. На рис. 7 и 8 видны усталостные трещины, вызванные данным фактором. Вместе с тем на рис. 9 видна трещина, которая вызвана комбинированным воздействием касательных и нормальных напряжений.

Отсутствие ссылок на методики расчетов прочности валопровода в правилах Регистров объясняются сложностью выполнения таких расчетов, поскольку внешние усилия, действующие на вал со стороны винта, трудно поддаются аналитическим зависимостям, особенно в условиях ледового плавания. Эти нагрузки являются не только квазистатическими, но и динамическими, которые вызывают изгибные колебания вала. Как показано выше, нормальные напряжения в гребном вале существенно зависят от смещения опор, которые могут быть вызваны погрешностями центровки, а также деформацией корпуса. Последняя может быть весьма велика у гибких судов внутреннего и смешанного плавания.

На наш взгляд, оценка усталостной прочности судовых валопроводов с учетом нормальных и касательных напряжений должна присутствовать в нормативных документах классификационных обществ, если не при проектировании, то при эксплуатации судна. Для этого необходимо прописать в Правилах требование экспериментального определения нормальных и касательных напряжений в валопроводах в процессе очередного освидетельствования судна. Очевидно, что измерение напряжений должно осуществляться в процессе швартовных и ходовых испытаний при характерных случаях нагрузки корпуса и при плавном изменении частоты вращения валопровода. Это позволит не только оценить усталостную прочность валопровода, но и выявить резонансные частоты вращения с позиций крутильных и изгибных колебаний.

При известных значениях изгибных напряжений  $\sigma_a$ , средних  $\tau_m$  и амплитудных  $\tau_a$  значениях касательных напряжений усталостная прочность может быть оценена по известной формуле комплексного коэффициента запаса прочности  $n$  [4]

$$n = \frac{n_\sigma n_\tau}{\sqrt{n_\sigma^2 + n_\tau^2}} \quad (2)$$

где  $n_\sigma$  - коэффициент запаса по нормальным напряжениям

$$n_\sigma = \frac{\beta_{\text{кор}} \sigma_{-1}}{\frac{k_\sigma}{\varepsilon_\sigma \beta_\sigma} \sigma_a} \quad (3)$$

$n_\tau$  – коэффициент запаса по касательным напряжениям

$$n_\tau = \frac{\beta_{\text{кор}} \tau_{-1}}{\frac{k_\tau}{\varepsilon_\tau \beta_\tau} \tau_a + \psi_\tau \tau_m} \quad (4)$$

Величину коэффициента  $n$  рекомендуется принимать не менее 1,30 – 1,50. Из формулы (2) следует, что в этом случае каждый из коэффициентов должен быть не менее 1,85.

Найдем из формулы (3) предельное значение нормального напряжения для гребного вала т/х «ЭЛАНД»

$$\sigma_a = \frac{\beta_{кор} \sigma_{-1}}{1,85 \frac{k_\sigma}{\varepsilon_\sigma \beta_\sigma}} \quad (5)$$

Коэффициент  $\beta_{кор}$  можно принять равным 0,3 в соответствии с рис.2.8 [7] для морской воды (для класса «М-ПР»).

Величину предела усталостной прочности можно принять равной

$$\sigma_{-1} = 0,5R_{eH} = 0,5 \cdot 540 = 270 \text{ МПа.}$$

Коэффициент концентрации напряжений в галтели  $k_\sigma$  по указанному выше чертежу вала и рис.2.10 [7] принимаем равным 1,8.

Коэффициент масштабного фактора  $\varepsilon_\sigma$  принимаем равным 0,593 по формуле (2.15) [7].

Коэффициент чистоты обработки поверхности  $\beta_\sigma$  принимаем равным 1,0 (полирование).

Подставляя найденные значения в формулу (5), получим  $\sigma_a = 14,4$  МПа.

Полученный результат показывает, что для обеспечения усталостной долговечности без ограничения срока эксплуатации вала, нормальные напряжения в нем должны быть весьма малыми. Формула (5) показывает, что величина  $\sigma_a$  существенно зависит от коэффициента  $\beta_{кор}$ . Величину этого коэффициента можно повысить, но даже при  $\beta_{кор}=1,0$  величина  $\sigma_a$  не должна превышать 48 МПа.

### **Заключение**

В результате анализа документов, предоставленных авторам как независимым экспертам арбитражным судом, показано, что причиной поломки гребного вала танкера «ЭЛАНД» явилось нарушение технологии монтажа и центровки судовых валопроводов на судоремонтном заводе, где выполнялись работы в рамках очередного освидетельствования в соответствии с требованиями правил Российского Речного Регистра, под надзором которого эксплуатируется данное судно.

При постановке судна в док и расстановке клеток не учтена упругая линия корпуса, в результате чего кормовая переборка на 7 шпангоуте потеряла устойчивость, что привело к уменьшению жесткости кормовой оконечности судна. Дефектация судна, выполненная после аварии, показала, что смещение оси кронштейна относительно оси дейдвуда составляет порядка 18 мм.

В работе выполнены оценочные расчеты нормальных напряжений в сечении гребного вала по дейдвуду при нарушении центровки, которые показали, что уровень напряжений весьма высок (185 МПа). При таком уровне напряжений из уравнения кривой усталости получено ориентировочное значение  $10^5$  числа циклов до разрушения гребного вала. Это число примерно соответствует числу оборотов двигателя за время перехода судна до момента поломки гребного вала.

В статье обращается внимание на то, что в правилах Морского и Речного Регистров нормируются лишь касательные напряжения в валопроводах, возникающие при крутильных колебаниях, и отсутствуют требования по нормированию нормальных напряжений. По мнению авторов, это является недостатком правил. На наш взгляд, в настоящее время имеется возможность экспериментальным путем определять напряжения в валах не только в процессе выполнения работ по центровке, но и в процессе выполнения ходовых испытаний судна после выполнения ремонтных или регламентных работ при основных видах нагружения корпуса. Статистика аварий судов, связанная с разрушением валов (в основном, гребных валов), показывает, что

практически все они происходят в грузе или балластном состоянии, когда корпус судна испытывает значительные деформации общего изгиба. Следует отметить, что эта статистика весьма неутешительна. Так, по сведениям ежегодных бюллетеней, выпускаемых Российским Речным Регистром, в которых фиксируются разного рода аварии и происшествия с судами, находящимися под его надзором, в период с 1991 по 2001 гг. имело место 115 повреждений гребных валов, а с 2002 по 2006 – 71 повреждение. Очевидно, что в эту статистику не вошли случаи замены валов в рамках работ по разным видам освидетельствования судов при обнаружении в них дефектов, не поддающихся восстановлению.

Очевидно, что введение экспериментального контроля напряженного состояния валопроводов в ходе указанных выше работ позволит повысить надежность их работы и сократить число аварийных случаев, связанных с разрушением валопроводов. Примерно аналогичные предложения имеют место в ряде публикаций: [8] ÷ [14].

#### Список литературы

1. Российский Речной Регистр. Правила (в 5-и томах). Т.1. М.: изд-во ООО «УП ПРИНТ», 2019 – 400 с.
2. ОСТ 5.4368-81 Валопроводы судовых движительных установок. Монтаж. Технические требования, правила приемки и методы контроля. – Л.: Изд-во типография НПО «Ритм», 1983. – 142 с.
3. Кузьмин А.В., Чернин И.М., Козинцов Б.С. Расчеты деталей машин: Справ. пособие. – Мн.: Выш. шк., 1986. – 400 с.
4. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструирование на прочность и долговечность: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
5. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. VII Механические установки – С-Петербург, 2018 – 64 с.
6. Российский Речной Регистр. Правила (в 5-и томах). Т.3. М.: изд-во ООО «УП ПРИНТ», 2019 – 424 с.
7. Румб В.К. Прочность судового оборудования. Конструирование и расчеты прочности судовых валопроводов: Учебник – СПб.: СПбГМТУ, 2008. – 298 с.
8. Комаров В.В., Курьлев А.С. Валопроводы рыбопромысловых судов. Ч.1. – Астрахань: Изд-во АГТУ, 1997. – 166 с.
9. Комаров В.В., Курьлев А.С. Валопроводы рыбопромысловых судов. Ч.2. – Астрахань: Изд-во АГТУ, 1997. – 176 с.
10. Комаров В.В. Центровка судовых валопроводов и главных двигателей. . – Астрахань: Изд-во АГТУ, 2010. – 431 с.
11. Grant R.B. Shaft alignment methods with strain gages and load celds. Marine Technology. – 1980, v.17, №1
12. Keshava Rao M.N., Dharaneepathy M.V., Gomathinayagam S., Ramaraju K., Chakravo P.K., Mishra P.K. Computeraided alignment of ship propulsion shaft by straingage methods. Marine Technology. - 1991. – v.28, №2, pp 84-90.
13. Vassilopoulos L. Static and underway alignment of main propulsion shaft systems. Naval Engineers Journal, 1988, v.100, №4, pp135-138.
14. Vilić N. Advanced shafting alignment: behavior of shafting in operation. Brodo Gradnja, №52, - 2004, pp 203-212.

#### References

1. Rossiyskiy Rechnoy Registr. Pravila (v 5-i tomakh). T.1. M.: izd-vo ООО «UP PRINT». 2019 – 400 s.
2. OST 5.4368-81 Valoprovody sudovykh dvizhitelnykh ustanovok. Montazh. Tekhnicheskiye trebovaniya. pravila priyemki i metody kontrolya. – L.: Izd-vo tipografiya NPO «Ritm». 1983. – 142 s.
3. Kuzmin A.V., Chernin I.M., Kozintsov B.S. Raschety detaley mashin: Sprav. posobiye. – Mn.: Vysh. shk.. 1986. – 400 s.

4. Kogayev V.P., Makhutov N.A., Gusenkov A.P. Raschety detaley mashin i konstruirovaniye na prochnost i dolgovechnost: Spravochnik. – M.: Mashinostroyeniye. 1985. – 224 s.
5. Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. Ch. VII Mekhanicheskiye ustanovki – S-Peterburg. 2018 – 64 s.
6. Rossiyskiy Rechnoy Registr. Pravila (v 5-i tomakh). T.3. M.: izd-vo OOO «UP PRINT». 2019 – 424 s.
7. Rumb V.K. Prochnost sudovogo oborudovaniya. Konstruirovaniye i raschety prochnosti sudovykh valoprovodov: Uchebnyk – SPb.: SPbGMTU. 2008. – 298 s.
8. Komarov V.V., Kurylev A.S. Valoprovody rybopromyslovykh sudov. Ch.1. – Astrakhan: Izd-vo AGTU. 1997. – 166 s.
9. Komarov V.V., Kurylev A.S. Valoprovody rybopromyslovykh sudov. Ch.2. – Astrakhan: Izd-vo AGTU. 1997. – 176 s.
10. Komarov V.V. Tsentrovka sudovykh valoprovodov i glavnykh dvigateley. . – Astrakhan: Izd-vo AGTU. 2010. – 431 s.
11. Grant R.B. Shaft alignment methods with strain gages and load celds. Marine Technology. – 1980, v.17, №1
12. Keshava Rao M.N., Dharaneepathy M.V., Gomathinayagam S., Ramaraju K., Chakravo P.K., Mishra P.K. Computeraided alignment of ship propulsion shaft by straingage methods. Marine Technology. - 1991. – v.28, №2, pp 84-90.
13. Vasilopoulos L. Static and underway alignment of main propulsion shaft systems. Naval Engineers Journal, 1988, v.100, №4, pp135-138.
14. Vilic N. Advanced shafting alignment: behavior of shafting in operation. Brodo Gradnja, №52, - 2004, pp 203-212.

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

**Гирин Станислав Николаевич**, к.т.н., профессор, профессор кафедры теории конструирования инженерных сооружений, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: girin.sn@vsuwt.ru .

**Stanislav N. Girin**, Ph.D. in Engineering Science, Professor, Professor of the Department of Theory of Engineering Constructions, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951, e-mail: girin.sn@vsuwt.ru

**Матвеев Юрий Иванович**, д.т.н., профессор кафедры «Эксплуатация судовых энергетических установок», Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: matveeveseu@mail.ru

**Yuri I. Matveev**, D.Sc., Professor of the Department Operation of Ship Power Plants, Volga State University of Water Transport, Russia, Nesterova 5, Nizhny Novgorod, 603950, e-mail: matveeveseu@mail.ru

Статья поступила в редакцию 01.03.2022; опубликована онлайн 07.06.2022.  
Received 01.03.2022; published online 07.06.2022.

УДК 629.12

DOI: 10.37890/jwt.vi71.249

## **Оптимизация комбинированного судна типа танкер/площадка на основе имитационного моделирования**

**И.А. Гуляев**<sup>1</sup>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2602-3115>

**Е.П. Роннов**<sup>2</sup>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3022-1926>

**Ю.А. Кочнев**<sup>2</sup>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6864-4473>

<sup>1</sup>*Российский Речной Регистр, г. Москва, Россия*

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

**Аннотация.** Для повышения эффективности нефтеналивных перевозок водным транспортом могут использоваться комбинированные суда различных архитектурно-конструктивных типов. На внутренних водных маршрутах наиболее перспективными являются суда типа танкер/площадка, перевозящие основной (наливной) груз в корпусе и обратный (сухой) на площадке, оборудованной на открытой палубе. В статье приведена общая математическая модель и алгоритм выбора элементов и характеристик указанного типа судов, позволяющие их оптимизировать в различных условиях эксплуатации при конкретизированных исходных данных. Проведённые обширные тестовые расчёты, систематизированные и представленные в виде графических зависимостей, показывают влияние скорости хода на коэффициент общей полноты корпуса при различных объёмах обратной загрузки, эффективность в виде относительной прибыли комбинированного судна по сравнению с «чистым» танкером от доли обратной загрузки и соотношении фрахтовых ставок по сухому и жидкому грузам. Также показана низкая зависимость относительной прибыли от протяженности линий эксплуатации.

**Ключевые слова:** комбинированное грузовое судно, танкер/площадка, оптимизация, коэффициент общей полноты.

## **Optimization of a combined tanker/platform type vessel based on simulation modeling**

**Ilya A. Gulyaev**<sup>1</sup>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2602-3115>

**Yuri A. Kochnev**<sup>2</sup>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6864-4473>

**Evgeniy P. Ronnov**<sup>2</sup>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3022-1926>

<sup>1</sup>*Russian River Register, Moscow, Russia*

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

**Abstract.** Combined vessels of various architectural and structural types can be used to increase the efficiency of oil-loading transportation by water transport. On inland waterways, the most perspective vessels are the tanker/platform type, carrying the main (bulk) cargo in the hull and the return (dry) on the platform equipped on an open deck. The article presents a general mathematical model and an algorithm for selecting elements and characteristics of

the specified type of vessels, allowing them to be optimized in various operating conditions with specified initial data. The carried out extensive test calculations, systematized and presented in the form of graphical dependencies, show the effect of the stroke speed on the coefficient of the overall completeness of the hull at various backloading volumes, the efficiency in the form of the relative profit of a combined vessel compared to a "clean" tanker from the share of backloading and the ratio of freight rates for dry and liquid cargo. The low dependence of the relative profit on the length of the lines of operation is also shown.

**Keywords:** combined cargo ship, tanker/platform, optimization, coefficient of overall completeness.

### **Введение**

Перевозимые на судах нефть и нефтепродукты являются наиболее эффективным решением по логистике этого вида массовых грузов по сравнению с другими транспортными средствами, используемыми для этих целей. Лучшими являются не только экономические показатели, но и характеристики экологического воздействия транспорта на окружающую среду, что в настоящее время приобрело весьма актуальное значение.

Перевозка осуществляется в специализированных нефтеналивных судах (танкерах). Их корпусные грузовые помещения (танки) практически нельзя использовать для обратной загрузки не только сухим навалочным грузом, но и другим видом наливного нефтегруза. Поэтому большая часть навигационного времени у этого типа судов приходится на балластные порожние переходы. Данное обстоятельство, конечно, имеет место и при подобных перевозках другими видами транспорта, что так же отрицательно сказывается на их эффективности.

В мировой морской практике судоходства, когда перевозка нефтепродуктов в прямом направлении сочетается с грузопотоком навалочных грузов в обратном, используются комбинированные суда. Они позволяют в обратном рейсе, как правило, в других грузовых помещениях перевозить сухие навалочные грузы. Их конструктивные типы проанализированы в работе [1] и подробно описаны в [2, 3, 4, 5].

Это суда-нефтерудовозы типа ОО, нефтенавалочники типа ОВ, нефтенавалочники-рудовозы типа ОВО и ВОВО. Нефтерудовозы типа ОО предназначены для переменной перевозки нефти в бортовых танках, не имеющих ни вторых бортов, ни второго дна, и руды в узком центральном трюме. При необходимости в трюме при выполнении соответствующих условий могут перевозиться нефть и нефтепродукты.

Нефтенавалочники типа ОВ по конструкции корпуса и грузовых помещений близки к типу ОО, но только в центральном грузовом трюме перевозят относительно лёгкие навалочные грузы, а не руду.

Нефтенавалочники-рудовозы типа ОВО перевозят нефть и нефтепродукты, а также навалочные грузы и руду в грузовых помещениях – трюмах-танках, оборудованных водогазонепроницаемыми люковыми крышками.

Комбинированные суда типа ВОВО перевозят навалочные и генеральные грузы, загружаемые в специальный твиндек накатом.

Комбинированные суда типа ОВО и ВОВО для эксплуатации на внутренних водных путях до настоящего времени не создавались по ряду объективных причин, и их реализация требует глубоких экономических и проектных обоснований. Перевозка сухого и нефтеналивного груза в одних и тех же грузовых помещениях на судах типа ОВО требует высокого качества их зачистки, что приводит к дополнительным временным и финансовым затратам, наличию прочного нефтегазового люкового

закрытия, усложняющего и удорожающего его конструкцию. Такие суда создаются, прежде всего, как крупные морские для линий большой протяженности и значительной партионностью груза. На них относительные потери полученного объема корпуса в его грузовом районе на вторые борта и второе дно несравнимо меньше, чем на судах внутреннего плавания, имеющих существенные ограничения на размерения габаритами судового хода.

В нашей стране была спроектирована и построена большая серия комбинированных судов типа нефтерудовоз ОО проектов 1553, 1570 и 15790. Они предназначались для перевозки нефтепродуктов в Северо-Западных бассейнах, а обратно - активной руды. Отсутствие второго дна и вторых бортов в бортовых грузовых нефтеналивных танках при современных экологических требованиях [6] сделало их эксплуатацию невозможной. При сравнительно небольшой ширине этих судов, принятой из условия прохода шлюзов Волго-Балтийского канала, модернизация с целью удовлетворения экологическим нормам [7] из-за существенного уменьшения грузовместимости и, соответственно, грузоподъемности не имеет экономических перспектив.

В Северном и Сухонском пароходствах эксплуатируются нефтеналивные несамходные суда (баржи) проектов Р93У, 81540, 81542, у которых на палубном перекрытии корпусных нефтеналивных танков, как у судна-площадки, находится грузовая площадка, используемая для перевозки навалочных и тарно-штучных грузов в обратном рейсе.

Используя такую же конструктивную схему корпуса Морское инженерное бюро (МИБ) спроектировало комбинированный теплоход проекта RST54, позволяющий использовать грузовое пространство в корпусе для перевозки наливных грузов, а на палубной грузовой площадке в обратном рейсе перевозить, как навалочный, так и генеральный груз. Серия судов проекта RST54 в 2014-2016 гг. построена и успешно эксплуатируется в настоящее время. Такой архитектурно-конструктивный тип комбинированного судна классифицируется условно как танкер/площадка [8], и требуется научно-методический анализ для обоснования проектных элементов и характеристик таких судов, предназначенных для различных условий эксплуатации.

### **Результаты**

Обратная загрузка комбинированного судна наряду с дополнительным доходом, приводит и к дополнительным затратам времени на погрузо-разгрузочные работы, на время их ожидания, манёвры, увеличение ходового времени. Последнее может быть следствием уменьшения скорости хода из-за наличия полной загрузки обратным грузом, а также из-за большей протяженности обратного рейса по сравнению с прямым (с жидким наливным грузом).

Отмеченное приводит к дополнительным эксплуатационным расходам, а также к уменьшению за навигационный период количества рейсов, перевезённого объема основного наливного груза и, соответственно, получаемого дохода.

Такой отрицательный эффект от обратной загрузки может быть уменьшен либо совсем устранён, в зависимости от того, насколько обоснованно приняты основные проектные элементы и характеристики судна.

Нефть и нефтепродукты относятся, как отмечалось выше, к массовым грузам, при перевозке которых используются суда максимальной грузоподъемностью [9]. Её повышение, исходя из этого, при принятых по условиям габаритов судового хода главных размерениях можно достигать увеличением коэффициента полноты водоизмещения.

На экономическую эффективность комбинированного судна, кроме отмеченной выше грузоподъёмности, влияют и другие проектные элементы судна, в том числе специфические для судов данного типа. Например, соотношение грузоподъёмностей по наливному и сухому грузу, протяженность линии с обратным грузом, фрахтовая ставка за него, скорость хода и др.

В целом это задача комплексная, требующая учета при её решении всех отмеченных выше обстоятельств, влияющих на эффективность обратной загрузки. Сделать это возможно, решая оптимизационную задачу обоснования проектных элементов и характеристик комбинированного судна.

Рассматривая судно как систему с множеством элементов с известными свойствами и связями между элементами, ориентированных на выполнение поставленных перед системой задач, проектирование судна можно трактовать как синтез технической системы. Тогда на основе системного, то есть комплексного подхода, задача синтеза оптимального проекта комбинированного судна в соответствии с [10] может быть сформулирована в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 & C(c_1, \dots, c_p); X(x_1, \dots, x_n); \\
 & (x_i)_{\min} \leq x_i \leq (x_i)_{\max}, \quad i = 1, \dots, n \\
 & x_i = \|x_{is}\|, \quad i = 1, \dots, n; \quad s = 1, \dots, s_i; \\
 & G_j(X, C) \geq A_j(C), \quad j = 1, \dots, m; \\
 & G_j(X, C) = A_j(C), \quad j = m + 1, \dots, M; \\
 & q_r(X, C) \otimes Q_r(C) = y_r, \quad y_r = 1, \dots, R \\
 & y_r = \begin{cases} 1; \\ 0; \end{cases} \\
 & \text{extr}Z(X, C).
 \end{aligned}$$

То есть при заданном векторе (множестве) исходных данных  $C(c_1, \dots, c_p)$  найти комбинацию (вектор  $X(x_1, \dots, x_n)$ ) варьируемых параметров, при котором функция цели  $Z$  будет достигать экстремума.

При этом должны выполняться на необходимом уровне  $A_j, Q_r$  требуемые навигационные и эксплуатационные качества  $G_j$  и  $q_r$  комбинированного судна, а также логические условия  $y_r$  по принципу «истина» (1) или «ложь» (0), используемые при переходе от одного условия к другому.

Варианты основных исходных данных и варьируемых параметров приведены в таблице 1. Отметим, что в перечень исходных данных традиционно включающих данные технического задания, также входят так называемые нормативы, определяющие предельные значения нормативных величин.



Таблица 1

Варианты исходных данных

Величины	Варианты задачи		
	Оптимизация с фиксированными главными размерениями	Оптимизация главных элементов	«Танкерный» вариант
Исходные данные	$L, B, T, H, L_{\text{ж}}, \Phi_{\text{ж}}, \rho_{\text{ж}}, \mu_c$	$P_{\text{ж}}, L_{\text{ж}}, \Phi_{\text{ж}}, T_{\text{н}}, \rho_{\text{ж}}, \mu_c$	$L, B, T, H, \rho_{\text{ж}}, L_{\text{ж}}, \Phi_{\text{ж}}$ либо $\rho_{\text{ж}}, P_{\text{ж}}, L_{\text{ж}}, \Phi_{\text{ж}}, v$
Варьируемые параметры	$\delta, v, \frac{P_c}{P_{\text{ж}}}, \frac{L_c}{L_{\text{ж}}}, \frac{\Phi_c}{\Phi_{\text{ж}}}$	$\delta, L/B, B/T, v, \frac{P_c}{P_{\text{ж}}}, \frac{L_c}{L_{\text{ж}}}$	$\delta, v$ либо $P_{\text{ж}}, \delta, L/B, B/T$
<p>В таблице приняты следующие обозначения:</p> <p><math>L_{\text{ж}}, L_c</math> – протяженность линии перевозки с жидким (прямым) и сухим (обратным) грузом соответственно;</p> <p><math>P_{\text{ж}}, P_c</math> – грузоподъемность по наливному и сухому грузу;</p> <p><math>\Phi_{\text{ж}}, \Phi_c</math> – фрахтовые ставки за перевозку нефтеналивного и сухого груза соответственно;</p> <p><math>\rho_{\text{ж}}, \mu_c</math> – плотность нефтеналивного и удельный погрузочный объем сухого грузов;</p> <p><math>\delta, v</math> – коэффициент полноты водоизмещения и скорость хода судна;</p> <p><math>T_{\text{н}}</math> – продолжительность навигационного периода;</p> <p><math>L, B, T, H</math> – главные размерения судна.</p>			

Ограничения  $G_j$  по существу определяют условия существования и целостности судна отдельно при прямом и обратном (с сухим грузом) рейсах и включают в себя условия обеспечения:

- плавучести

$$D'(C, X) = \rho g V(X, C),$$

$D'(C, X)$  – сила веса, кН;

$V(X, C)$  – объемное водоизмещение, м<sup>3</sup>;

- баланса масс

$$D(C, X) - \sum P_i(X, C) = P_{\text{сп}},$$

$D(C, X)$  – масса судна, т;

$P_i(X, C)$  –  $i$ -ая составляющая нагрузки масс, т;

$P_{gp}$  – грузоподъёмность судна по прямому или обратному рейсу, т.

- ходкости

$$N(C, X) - \frac{R(C, X) \times v}{\eta(C, X) \times \eta_6} = 0,$$

$N(C, X)$  – суммарная мощность главных двигателей, кВт;

$R(C, X)$  – полное сопротивление движению судна, кН;

$\eta(C, X)$  – пропульсивный коэффициент;

$\eta_6$  – коэффициент, учитывающий потери на валопроводе и редукторе;

- вместимость по наливному  $P_{жс}$  и сухому грузу  $P_c$

$$W_T(C, X) \geq \frac{P_{жс}}{\rho_{жс}},$$

$$W_c(C, X) \geq \mu_c P_c,$$

$W_T(C, X), W_c(C, X)$  – объём грузовых помещений под наливной и сухой груз, м<sup>3</sup>;

$\rho_{жс}, \mu_c$  – плотность наливного и удельный погрузочный объём сухого груза соответственно;

- общей продольной прочности

$$\sigma_p(C, X) \leq [\sigma]_{дон},$$

$$\frac{L(C, X)}{H(C, X)} \leq L/H(C),$$

$\sigma_p(C, X)$  – наибольшие расчётные напряжения при общем продольном изгибе корпуса, Па;

$[\sigma]_{дон}$  – допускаемые напряжения, Па;

$L(C, X), H(C, X)$  – длина и высота борта судна, м;

$L/H(C)$  – максимально допустимое отношение длины к высоте борта судна;

- остойчивости

$$M_{кр}(C, X) \leq M_{дон}(C, X),$$

$$h(C, X) \geq h_{\min},$$

$M_{кр}(C, X)$ ,  $M_{доп}(C, X)$  – кренящий и допускаемый момент при соответствующем наклонении, кНм;

$h(C, X)$ ,  $h_{\min}$  – начальная метацентрическая высота и допустимое её значение, м

- минимальной высоты надводного борта

$$H(C, X) - T(C, X) \geq H_{нб}(C, X),$$

$T(C, X)$  – осадка судна, м;

$H_{нб}(C, X)$  – регламентируемое минимальное значение надводного борта, м;

- диапазон возможных значений варьируемых величин

$$x_{i\min} \leq x_i \leq x_{i\max}$$

- ограничения на точность расчётных характеристик

$$\left| \frac{D_i - D_{i-1}}{D_i} \right| \leq \zeta_1,$$

$$\left| \frac{N_j - N_{j-1}}{N_j} \right| \leq \zeta_2,$$

$$\left| \frac{Z_q - Z_{q-1}}{Z_q} \right| \leq \zeta_3,$$

$Z_q$  – критерий оптимальности на q-ом шаге поиска;

$\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$  – допустимое значение расхождения двух смежных величин.

В качестве критерия оптимальности (функции цели)  $Z(C, X)$  могут быть приняты следующие удельные показатели экономической эффективности, отнесённые к показателям «чистого» танкера:

$$\Pi = \frac{\Pi_K}{\Pi_T}, \quad Z_{np} = \frac{Z_{ПРК}}{Z_{ПРТ}}, \quad T_{ок} = \frac{T_{окК}}{T_{окТ}},$$

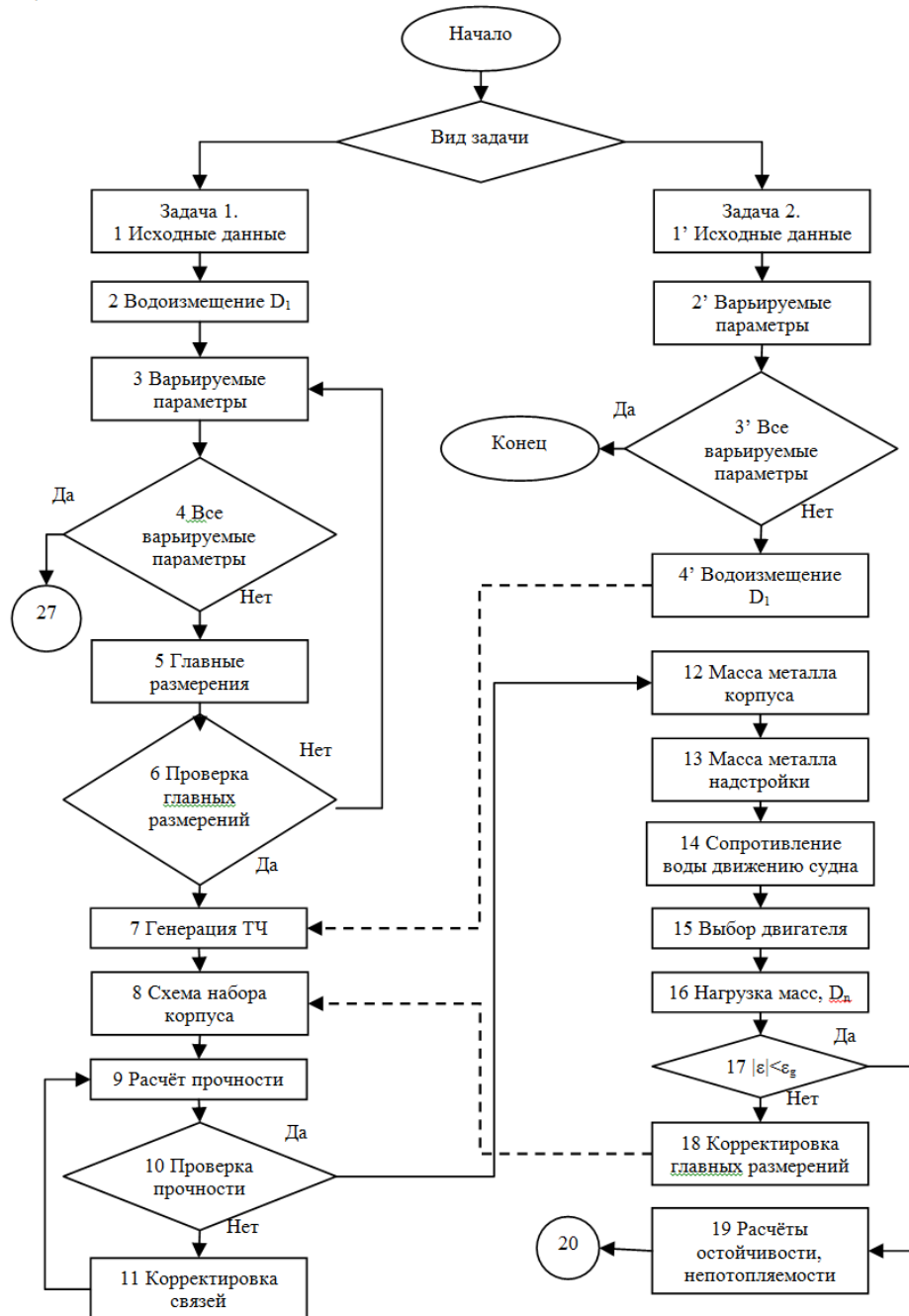
$\Pi_K, \Pi_T$  – прибыль, получаемая от перевозки комбинированным судном и танкером соответственно;

$Z_{ПРК}, Z_{ПРТ}$  – приведённые затраты по комбинированному судну и танкеру соответственно;

$T_{окК}, T_{окТ}$  – срок окупаемости комбинированного судна и танкера соответственно.

На рисунке 1 представлена укрупнённая блок-схема задачи синтеза оптимального проекта комбинированного судна рассматриваемого типа и сопоставляемого с ним танкера. Она предусматривает решение двух задач. В первой главные размеры задаются, и они соответствуют максимально возможным из условия габаритов судового хода в рассматриваемом бассейне эксплуатации судна.

а) часть I



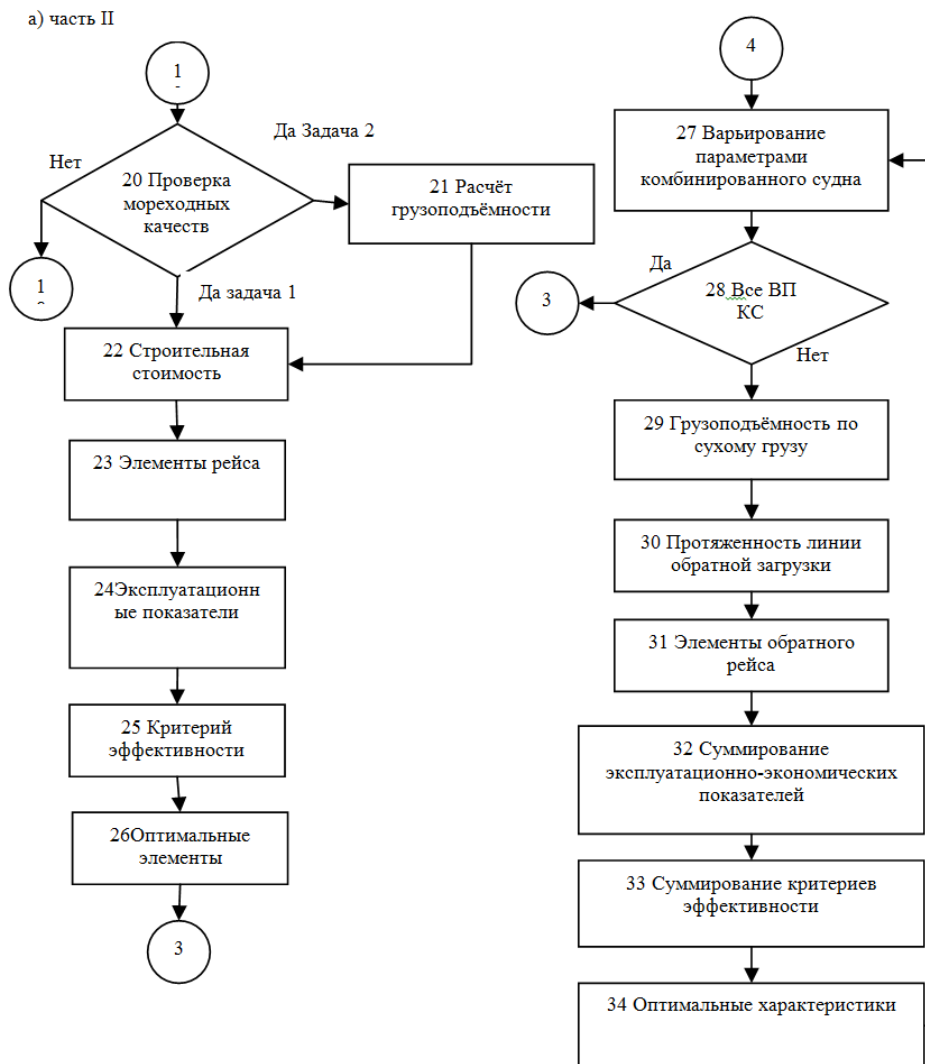


Рис. 1. Блок-схема оптимизации проектных элементов и характеристик комбинированного судна типа танкер/площадка

Вторая задача соответствует проектированию судна заданной грузоподъёмности, когда ограничения на размерения судна отсутствуют. Методики и процедуры проектирования корпуса, расчёта нагрузки масс, расчёта прочности, ходкости, устойчивости, вместимости и непотопляемости приведены в наших работах [11, 12, 13, 14]. Строительная стоимость рассчитывалась исходя из стоимости материалов, трудоёмкости изготовления, зарплаты основного и вспомогательного персонала, налоговых и амортизационных отчислений и норм прибыли.

Элементы прямого и обратного рейсов включают в себя определения ходового времени, времени погрузки и выгрузки, ожидания грузовых работ и манёвров. Эксплуатационные расходы и получаемые доходы рассчитывались по общепринятой схеме с использованием среднеотраслевых нормативов на речном транспорте.

Разработанное на языке FORTRAN [15] программное обеспечение реализует приведённые выше алгоритм синтеза как комбинированного судна типа танкер/площадка, так и сопоставляемого с ним «чистого» танкера и позволяет оптимизировать главные проектные элементы и характеристики этих судов.

Выполненные широкие тестовые расчёты подтверждают работоспособность программы и позволяют проанализировать, как зависят характеристики комбинированного судна от соответствующих варьируемых параметров, определяющих его экономическую эффективность по сравнению с танкером.

Одним из основных варьируемых параметров, обеспечивающих максимум грузоподъёмности и, соответственно, дохода при принятых главных размерениях, является коэффициент полноты водоизмещения  $\delta$ . В теории проектирования судов введено понятие о так называемом экономическом значении коэффициента  $\delta$ , при превышении которого происходит интенсивный рост сопротивления движению судна, мощности главных двигателей, расходов на топливо, ухудшение экономических показателей работы. Отсюда и следует, что задача выбора коэффициента  $\delta$  при соответствующей скорости хода является экономической задачей. Его величина для судов с соотношением главных размерений как у морских, может быть найдена, например, по формулам Тейлора и Александра [16]. Существует значительное количество работ [7, 17, 18, 19, 20] в которых приводятся выражения, связывающие адекватные значения коэффициента полноты  $\delta$  со скоростью хода. Все они отражают статистические данные по существующим грузовым судам, и нет рекомендаций, основанных на непосредственно экономическом анализе. Суть этого анализа сводится к определению предельно возможного увеличения полноты корпуса судна, при котором вызванный рост сопротивления воды движению и, следовательно, увеличивающиеся расходы на топливо главными двигателями будут компенсированы возросшими доходами и прибылью из-за увеличения за счёт коэффициента полноты  $\delta$  грузоподъёмности судна.

Экономический анализ при обосновании применительно к грузовым судам максимальных размерений для Волжско-Камского бассейна ограниченного района плавания выполнены МИБом и приведены в работе [21]. Для анализа влияния формы корпуса на ходкость были использованы данные буксировочных испытаний моделей судов проекта МИБа. Пересчитанная на натуру буксировочная мощность была основной при выборе характеристик движительно-рулевых комплексов этих судов, оценки их строительной стоимости и эксплуатационных расходов. Выполненные в итоге расчёты эксплуатационно-экономических показателей судов подтвердили превышение прибыльности с ростом значений коэффициента  $\delta$ , с достижением его максимума до 0,93, в соответствующем скоростном диапазоне хода.

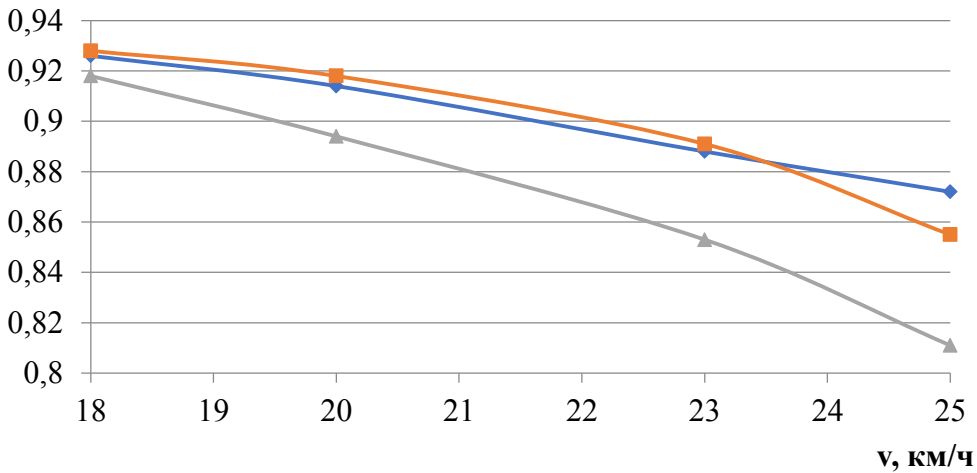
У комбинированных судов эта тенденция качественно, безусловно, сохраняется. Но она требует корректировки исходя из необходимости учета дополнительной загрузки в обратном рейсе. Она, с одной стороны, даёт дополнительный доход, зависящий от фрахтовой ставки и количества сухого груза на судне. Но в то же время при гружёном обратном рейсе возрастает, по отмеченным выше обстоятельствам, время кругового рейса и эксплуатационные расходы.

На рисунке 2 приведена зависимость оптимального значения коэффициента полноты  $\delta$  от скорости хода, рассчитанная по приведённой выше оптимизационной методике с учётом отмеченных влияний полноты корпуса с размерениями

применительно к комбинированным судам типа танкер/площадка проекта RST54 (Проект 1), нефтерудовоза проекта 1553 (Проект 2) и танкера Лена-нефть проекта P77 (Проект 3).

а) при одинаковой грузоподъемности по сухому и наливному грузу

**допт**



б) грузоподъемность по грузу 20% от наливного

**допт**

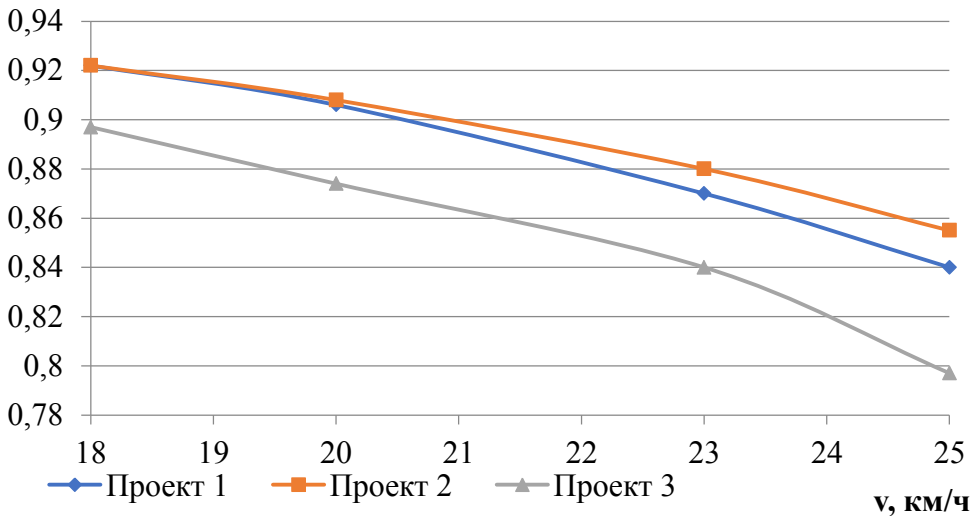


Рис. 2. Оптимальное значение коэффициента общей полноты

Уменьшение величины грузоподъемности по обратному сухому грузу приводит к уменьшению дохода за круговой рейс. Это не позволяет компенсировать эксплуатационные затраты, связанные с увеличением сопротивления движению и

мощности главных двигателей при коэффициенте  $\delta$  соответствующей обратной загрузки, равной грузоподъёмности по прямому рейсу наливным грузом. Поэтому полнота корпуса уменьшается, что и видно из анализа приведённых зависимостей.

Так как степень влияния полноты корпуса на сопротивление движению судна зависит от скоростного режима, корректнее зависимость максимально допустимого значения коэффициента полноты  $\delta$  показывать в функции от числа Фруда (рисунок 3).

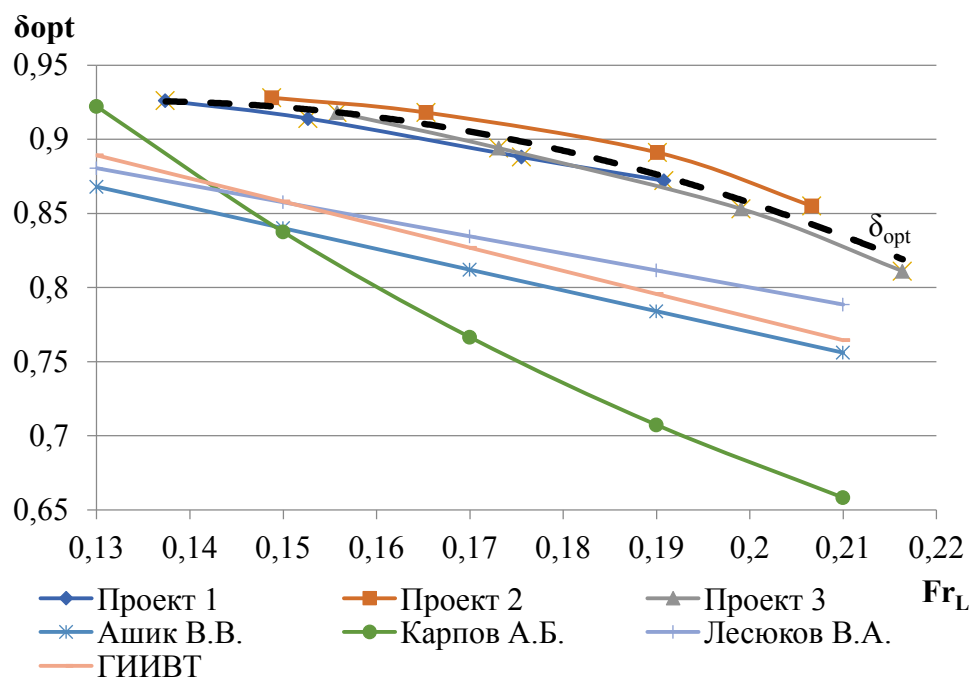


Рис. 3. Оптимальное значение коэффициента общей полноты зависимости от числа Фруда.

Плотность расположения в этом случае расчётных точек позволяет получить регрессионную зависимость

$$\delta = 0,645 + 4,188Fr_L - 15,65Fr_L^2$$

Приведённые на рисунке 3 графики некоторых известных статистических зависимостей подтверждают необходимость при выборе коэффициента полноты  $\delta$  исходить не только из общепринятых требований, но и учитывать результаты глубокого экономического анализа.

Грузоподъёмность по обратному сухому грузу и его фрахтовая ставка безусловно влияют на экономическую эффективность комбинированного судна в сравнении с танкером тех же размерений. На рисунке 4 дана зависимость изменения от этих факторов прибыли комбинированного судна по сравнению с прибылью танкера такой же грузоподъёмности по наливному грузу (5000т), но с балластным пробегом в обратном рейсе. Из графика следует, что при массе обратного груза до 20% от основного наливного и при фрахте за него мене 0,8 от фрахта за основной груз эффективность комбинированного судна практически не превышает эффективность танкера. Такой же вывод можно сделать, если фрахт не превышает 20% от фрахта



перевозимого нефтегруза. Проведённые аналогичные расчёты при сравнении с танкерами с грузоподъёмностью 3500 и 2700 т. также согласуются с этими выводами.

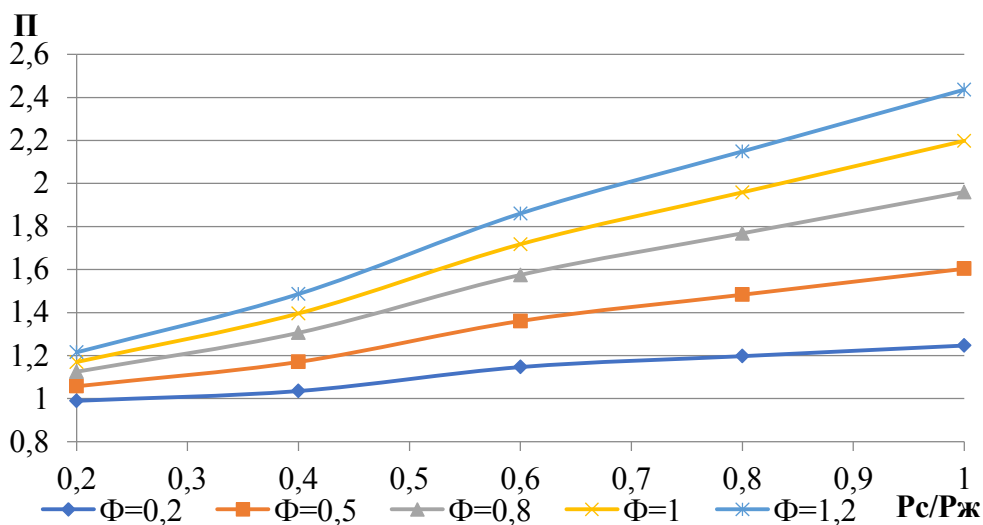


Рис. 4. Зависимость относительной прибыли комбинированного судна от соотношения грузоподъёмностей по сухому и наливному грузу при различных соотношениях их фрахтовых ставок

Эффективность комбинированного судна при одинаковой полной загрузке в прямом и обратном рейсах и неизменных фрахтовых ставках за сухой груз не зависит от протяженности линии (рисунок 5). Однако при низких ставках  $\Phi \leq 0,2$  увеличение линии обратного рейса отрицательно сказывается на показателях прибыли.

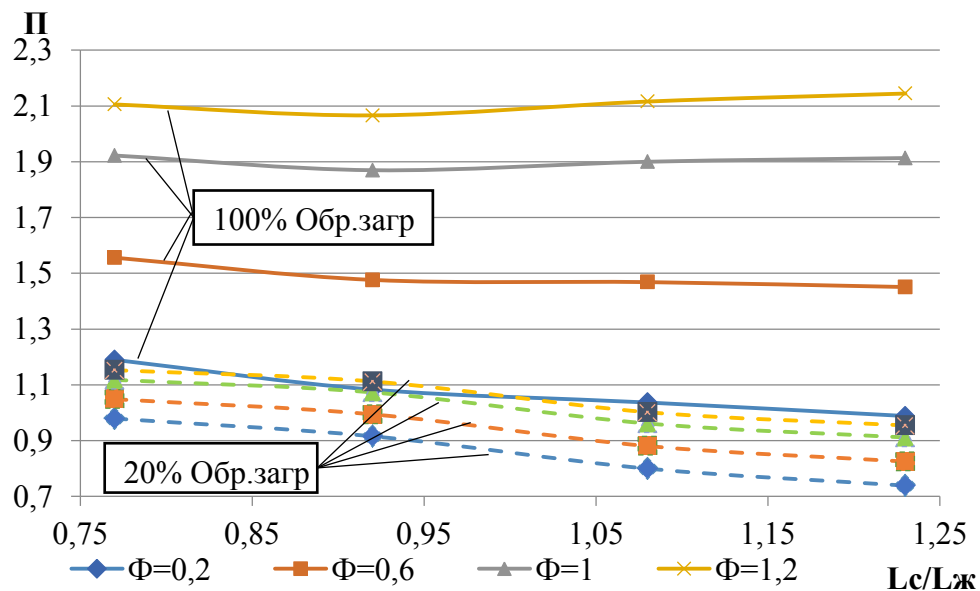


Рис. 5. Зависимость относительной прибыли комбинированного судна от соотношения длины линии с сухим грузом к линии с жидким грузом при их различных фрахтовых ставках

Кроме того, надо иметь в виду, что обратный гружёный рейс может иметь «фрагтовый» сухой груз только на части его протяженности, поскольку некоторая доля линии при этом уходит на порожние пробеги к месту погрузки. Это особенно характерно при соотношении  $L_C/L_{Ж} > 1$ . Разработанная математическая модель учитывает это обстоятельство, отрицательно влияющее на эффективность судна. Доля холостого (без груза) пробега в обратном рейсе задаётся в исходных данных.

Увеличение загрузки в обратном рейсе приводит к повышению эффективности комбинированного судна вне зависимости от протяженности линии эксплуатации (рисунок 6). При этом грузоподъёмность по обратному грузу должна быть не менее 40% от наливного и 40% при длине линии 500 км.

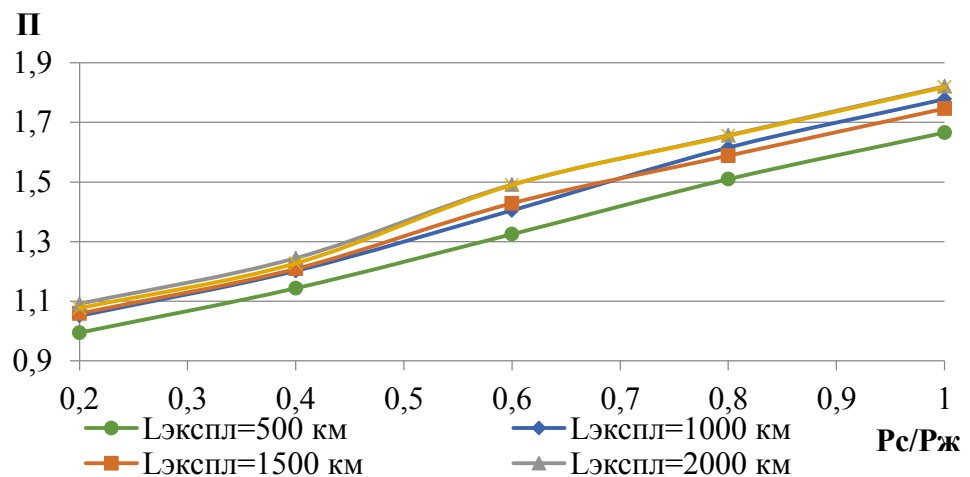


Рис. 6. Зависимость эффективности комбинированного судна по сравнению с танкером грузоподъёмностью 5000 т от грузоподъёмности по сухому грузу и протяженности линии эксплуатации

### Выводы

Разработанное программное обеспечение предназначено для решения задач оптимизации основных проектных элементов и характеристик комбинированных судов типа танкер/площадка в системе сопоставления с имеющим такие же размерения и грузоподъёмность нефтеналивным танкером. Выполненные широкие тестовые расчёты подтверждают работоспособность программы и позволили проанализировать характеристики функциональных зависимостей основных оптимизируемых параметров от соответствующих исходных данных.

### Список литературы

1. И.А. Гуляев. Классификация и архитектурно-конструктивные особенности комбинированных судов / Гуляев И.А., Роннов Е.П. // Научные проблемы водного транспорта, 62, 2020 – с. 40-50. DOI: 10.37890/jwt.vi62.38
2. Burneett A. To own a combination ship. "Marine design international", march 26, 1971, p. 19
3. Dorman W. Combination bulk carriers. "Marine technology", 1966, N4, p. 409-453.
4. Marie Douet. Combined ships: an empirical investigation about versatility, Maritime Policy & Management, 1999, VOL. 26, NO. 3, p. 231-248

5. Report of the Commission on American Shipbuilding, Volume III, Annexes IA-IE. United States Commission on American Shipbuilding, 1973, p. 684
6. Технический регламент о безопасности объектов внутреннего водного транспорта (с изменениями на 6 августа 2020 года). Утвержден Постановлением Правительства Российской Федерации от 12 августа 2010 г. N 623
7. ФАУ «Российский Речной Регистр». Правила классификации и постройки судов. [Режим доступа]: <https://www.rivreg.ru/assets/Uploads/izveshenia/Rossiyskiy-Rechnoy-Registr.-PRAVILA-2019.-May-2021.pdf>
8. Егоров Г.В. «Сверхполные» комбинированные суда проекта RST54 для перевозки нефтепродуктов и сухих грузов, а также контейнеров, накатной техники и проектных грузов / Егоров Г. В., Тонюк В. И., Дурнев Е.Ю // Судостроение, № 4, 2017 г.
9. Егоров Г.В., Егоров А.Е. Основные решения нового поколения «сверхполных» грузовых судов смешанного (река-море) и внутреннего плавания // Судостроение. №4, 2018 – с.9-15
10. Гайкович А.И. Моделирование процессов создания морской техники. С-Пб.: Электронное издание, СПбГМТУ. – 2015 – 149с.
11. Гуляев И.А. Математическая модель расчёта массы металлического корпуса комбинированного судна / И.А. Гуляев, Е.П. Роннов, Ю.А. Кочнев // Научные проблемы водного транспорта, Выпуск 63, 2020 – с. 48-54. DOI: 10.37890/jwt.vi63.75
12. Гуляев И.А. Прогнозирование сопротивления движению грузовых комбинированных судов в задаче их оптимизации / И.А. Гуляев, Ю.А. Кочнев // Труды 22-го международного научно-промышленного форума "Великие реки-2020" (27-29 мая 2020 г.). Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек, Нижний Новгород, 2020 г.
13. Гуляев И.А. Анализ остойчивости комбинированных судов на стадии исследовательского проектирования / Е.П. Роннов, И.А. Гуляев // Научные проблемы водного транспорта. 2021. № 66. – с. 29-35. DOI: 10.37890/jwt.vi66.158
14. Гуляев И.А. Расчет грузоподъемности комбинированных судов в задаче оптимизации главных элементов / И.А. Гуляев, Е.П. Роннов // Научные проблемы водного транспорта. 2021. № 68. С. 59-67. DOI: 10.37890/jwt.vi68.184
15. Бартедьев, О.В. Современный фортран - 3-е изд., доп. и перераб. - М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2000. - 449 с.
16. Ашик В. В. Проектирование судов: Учебник. - 2-е изд., перераб. и доп. - Л.: Судостроение, 1985.-320 с.
17. Дормидонтов Н. К., Анфимов В. Н., Малый П. А., Пахомов Б. А., Шмуйлов Н. Л. Проектирование судов внутреннего плавания. Л.: Судостроение, 1974, 335с.
18. Лесюков В.А. Теория и устройство судов внутреннего плавания. Учебник для вузов водного транспорта - М.: Транспорт, 1982. – 303 с.
19. Роннов, Е. П. Статистическая модель прогнозирования остаточного сопротивления грузовых судов внутреннего и смешанного плавания / Е. П. Роннов, П. С. Цыбин // Труды ГИИВТ. - Горький, 1988. – Вып. 235. - С. 35-48.
20. Prateek Gupta, Bhushan Taskar, Sverre Steen, Adil Rasheed, Statistical modeling of Ship's hydrodynamic performance indicator // Applied Ocean Research, Volume 111, June 2021, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102623>
21. Егоров Г.В. О возможности создания судна смешанного река-мореплавания с предельно высоким коэффициентом общей полноты // Труды Центрального научно-исследовательского института им. академика А.Н. Крылова. 2013. № 75 (359). С. 6-14.

#### References

1. Gulyaev I.A. Ronnov E.P. Klassifikatsiya i arkhitekturno-konstruktivnye osobennosti kombinirovannykh sudov [Classification and architectural and structural features of combined vessels]. Nauchnye problemy vodnogo transporta, 62, 2020, s. 40-50. DOI: 10.37890/jwt.vi62.38
2. Burneett A. To own a combination ship. "Marine design international", march 26, 1971, p. 19.
3. Dorman W. Combination bulk carriers. "Marine technology", 1966, N4, p. 409-453.

4. Marie Douet. Combined ships: an empirical investigation about versatility, Maritime Policy & Management, 1999, VOL. 26, NO. 3, p. 231-248.
5. Report of the Commission on American Shipbuilding, Volume III, Annexes IA-IE. United States Commission on American Shipbuilding, 1973, p. 684
6. Tekhnicheskii reglament o bezopasnosti ob'ektov vnutrennego vodnogo transporta [Technical Regulations on the safety of inland water transport facilities] (s izmeneniyami na 6 avgusta 2020 goda). Utverzhden Postanovleniem Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 12 avgusta 2010 g. N 623
7. FAU «Rossiiskii Rechnoi Registr». Pravila klassifikatsii i postroiki sudov. [Rezhim dostupa]: <https://www.rivreg.ru/assets/Uploads/izveshenia/Rossiyskiy-Rechnoy-Registr.-PRAVILA-2019.-May-2021.pdf>
8. Egorov G. V., Tonyuk V. I., Durnev E.YU «Sverkhpolnye» kombinirovannye suda proekta RST54 dlya perevozki nefteproduktov i sukhikh gruzov, a takzhe konteinerov, nakatnoi tekhniki i proektnykh gruzov. ["Super-full" combined vessels of the RST54 project for the transportation of petroleum products and dry cargo, as well as containers, rolling equipment and project cargo] Sudostroenie, № 4, 2017 g.
9. Egorov G.V., Egorov A.E. Osnovnye resheniya novogo pokoleniya «sverkhpolnyKH» gruzovykh sudov smeshannogo (reka-more) i vnutrennego plavaniya [The main solutions of the new generation of "super-full" cargo vessels of mixed (river-sea) and inland navigation]. Sudostroenie. №4, 2018, s.9-15
10. Gaikovich A.I. Modelirovanie protsessov sozdaniya morskoi tekhniki. [ Modeling of the processes of creating marine equipment] S-Pb.: Ehlektronnoe izdanie, SPBGMTU, 2015, 149s.
11. I.A. Gulyaev, E.P. Ronnov, YU.A. Kochnev Matematicheskaya model' rascheta massy metallicheskogo korpusa kombinirovannogo sudna [Mathematical model for calculating the mass of the metal hull of a combined vessel]. Nauchnye problemy vodnogo transporta, Vypusk 63, 2020, s. 48-54. DOI: 10.37890/jwt.vi63.75
12. I.A. Gulyaev, YU.A. Kochnev Prognozirovanie soprotivleniya dvizheniyu gruzovykh kombinirovannykh sudov v zadache ikh optimizatsii [Forecasting the resistance to the movement of combined cargo vessels in the task of their optimization]. Trudy 22-go mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma "Velikie reki-2020" (27-29 maya 2020 g.). Problemy ispol'zovaniya i innovatsionnogo razvitiya vnutrennikh vodnykh putei v basseynakh velikikh rek, Nizhnii Novgorod, 2020 g.
13. E.P. Ronnov, I.A. Gulyaev Analiz ostoichivosti kombinirovannykh sudov na stadii issledovatel'skogo proektirovaniya [Stability analysis of combined vessels at the research design stage]. Nauchnye problemy vodnogo transporta. 2021. № 66, s. 29-35. DOI: 10.37890/jwt.vi66.158
14. I.A. Gulyaev, E.P. Ronnov Raschet gruzovmestimosti kombinirovannykh sudov v zadache optimizatsii glavnykh ehlementov [Calculation of cargo capacity of combined vessels in the problem of optimization of the main elements]. Nauchnye problemy vodnogo transporta. 2021. № 68. S. 59-67. DOI: 10.37890/jwt.vi68.184
15. Barten'ev, O.V. Sovremenniyi fortran [Modern Fortran] - 3-e izd., dop. i pererab. - M.: DIALOG-MIFI, 2000. - 449 s.
16. Ashik V. V. Proektirovanie sudov [Ship design]: Uchebnik. - 2-e izd., pererab. i dop. - L.: Sudostroenie, 1985.-320 s.
17. Dormidontov N. K., Anfimov V. N., Malyi P. A., Pakhomov B. A., Shmuilov N. L. Proektirovanie sudov vnutrennego plavaniya [Design of inland navigation vessels]. L.: Sudostroenie, 1974, 335c.
18. Lesyukov V.A. Teoriya i ustroistvo sudov vnutrennego plavaniya [Theory and design of inland navigation vessels]. Uchebnik dlya vuzov vodnogo transporta - M.: Transport, 1982. – 303 s.
19. E. P. Ronnov, P. S. Tsybin Statisticheskaya model' prognozirovaniya ostatochnogo soprotivleniya gruzovykh sudov vnutrennego i smeshannogo plavaniya [Statistical model for predicting the residual drag of inland and mixed cargo vessels], Trudy GIIVT. - Gor'kii, 1988. – Vyp. 235. - S. 35-48.

20. Prateek Gupta, Bhushan Taskar, Sverre Steen, Adil Rasheed, Statistical modeling of Ship's hydrodynamic performance indicator // Applied Ocean Research, Volume 111, June 2021, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102623>
21. Egorov G.V. O vozmozhnosti sozdaniya sudna smeshannogo reka-moreplavaniya s predel'no vysokim koefffitsientom obshchei polnoty [About the possibility of creating a mixed river navigation vessel with an extremely high coefficient of overall completeness]. Trudy Tsentral'nogo nauchno-issledovatel'skogo instituta im. akademika A.N. Krylova. 2013. № 75 (359). S. 6-14.

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

**Гуляев Илья Александрович**, начальник корпусного отдела ФАУ «Российский Речной Регистр», Окружной проезд, 15, корп. 2, Москва, 105187, e-mail: [guliaev@rivreg.ru](mailto:guliaev@rivreg.ru),

**Илья А. Gulyaev**, Head of Hull Department, Federal Autonomous Institution Russian River Register, bld. 2, 15, Okruzhnoy proezd, Moscow, Russia, 105187

**Кочнев Юрий Александрович**, к.т.н., доцент, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: [tmnkochev@mail.ru](mailto:tmnkochev@mail.ru)

**Yuri A. Kochnev**, Federal State-Financed Educational Institution of Higher Education Volga State University of Water Transport (VSUWT), 5, Nesterova street, Nizhny Novgorod, Russia, 603950

**Роннов Евгений Павлович**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: [kaf\\_ptps@vsuwt.ru](mailto:kaf_ptps@vsuwt.ru)

**Evgeniy P. Ronnov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department, Federal State-Financed Educational Institution of Higher Education Volga State University of Water Transport (VSUWT), 5, Nesterova street, Nizhny Novgorod, Russia, 603950

Статья поступила в редакцию 07.04.2022; опубликована онлайн 07.06.2022.  
Received 07.04.2022; published online 07.06.2022.

УДК 629.5.01  
DOI: 10.37890/jwt.vi71.250

## **Многокритериальная оптимизация судовых устройств и их элементов**

**А.А. Зорин<sup>1</sup>**  
**Д.А. Миролюбов<sup>1</sup>**  
**В.В. Кузнецова<sup>1</sup>**  
ORCID: 0000-0002-8338-7532

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

**Аннотация.** В статье ставится задача выбора типа судовых устройств. Рассмотрен один из методов решения задачи многокритериальной оптимизации на основе аддитивной свертки критериев. Описан способ нормализации частных критериев оптимальности и способ определения «весовых» коэффициентов. Приведены критерии эффективности, которые могут быть применены в задачах оптимизации люковых закрытий грузовых судов. Решена задача многокритериальной оптимизации люковых закрытий на примере существующих судов. Приведены результаты расчетов в табличной форме. Рассмотрены критерии эффективности, которые могут быть применены в задачах оптимизации шлюпок и шлюпбалок. Решена задача многокритериальной оптимизации шлюпок и шлюпбалок. Приведены результаты расчетов в табличной форме. Сделаны соответствующие выводы.

**Ключевые слова:** судовые устройства, люковые закрытия, шлюпочное устройство, многокритериальная оптимизация, критерий эффективности, «весовые» коэффициенты, нормализация критериев эффективности, метод аддитивной свертки.

## **Multicriteria optimization of ship devices and their elements**

**Alexander A. Zorin<sup>1</sup>**  
**Dmitry A. Mirolubov<sup>1</sup>**  
**Vera V. Kuznetsova<sup>1</sup>**  
ORCID: 0000-0002-8338-7532

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

**Abstract.** The article sets the task of choosing the type of ship devices. One of the methods for solving the problem of multicriteria optimization based on additive convolution of criteria is considered. A method for normalizing partial optimality criteria and a method for determining "weight" coefficients are described. Efficiency criteria are given that can be applied in the problems of optimization of hatch covers for cargo ships. The problem of multicriteria optimization of hatch covers is solved on the example of existing ships. The results of calculations are presented in tabular form. Efficiency criteria that can be applied in optimization problems for lifeboats and davits are considered. The problem of multicriteria optimization of lifeboats and davits is solved. The results of calculations are presented in tabular form. Appropriate conclusions are drawn.

**Keywords:** ship devices, hatch covers, lifeboat device, multicriteria optimization, efficiency criterion, "weight" coefficients, efficiency criteria normalization, additive convolution method.

## **Введение**

Судовые устройства предназначены для обеспечения нормальной эксплуатации судна, это совокупность механизмов, аппаратов, машин. Они могут быть общими и специальными, которые обусловлены назначением судна. К общим судовым устройствам относят рулевое, якорное, швартовное и шлюпочное. Последнее рассмотрим подробнее. Шлюпочное устройство необходимо для обеспечения спасения людей в случае аварии и гибели судна, связи судна с берегом, выполнения работ на плаву около судна. В его состав входят:

- спасательные шлюпки;
- рабочие шлюпки и разъездные катера;
- шлюпбалки, которые служат для быстрого и безопасного спуска и подъема спасательных шлюпок;
- приспособления для хранения шлюпок и катеров по-походному.

По конструкции спасательные шлюпки разделяются на:

- открытые (ОСШ);
- частично закрытые (ЧЗСШ);
- полностью закрытые (ПЗСШ).

Шлюпбалки необходимы для спуска шлюпки на воду или подъема их с воды на борт. Шлюпбалки бывают различных систем, наиболее широко распространены поворотные, заваливающиеся (откидные) и гравитационные (склоняющиеся, скатывающиеся или шарнирные).

Спусковые и посадочные устройства обеспечивают безопасную посадку и спуск коллективных спасательных средств на воду, должны иметь достаточную прочность (надежность) [1,2].

К специальным судовым устройствам можно отнести, например, грузовое устройство. Люковые закрытия грузовых трюмов разделяют на съемные, откатываемые, откидные, сдвигаемые и наматываемые. Они обеспечивают необходимую безопасность судна и сохранность груза, уменьшить трудоемкость и продолжительность грузовых операций, позволяют увеличить габариты грузовых люков) [3,4].

При разработке проекта судна встает задача выбора того или иного элемента судового устройства, его типа. Этот выбор зависит от нескольких критериев, таких как прочность, стоимость, трудоемкость, время приведения в рабочее состояние и т.д. Качество какого-либо решения должно оцениваться по нескольким критериям, многие из которых при этом «конфликтуют» между собой. В таком случае выбор наилучшего решения становится непростой задачей. Всегда необходимо искать компромиссное решение, которое учитывает важность каждого критерия. Невозможно охватывать лишь одним критерием все предъявляемые к объекту требования. Оптимальное решение должно удовлетворять эксплуатационным требованиям и в то же время должно быть выгодно с экономической точки зрения, то есть необходимо использовать многокритериальные методы принятия решения.

## **Выбор метода многокритериальной оптимизации и его характеристика**

При решении задачи оптимизации, как правило, рассматривают несколько критериев эффективности, по которым производится выбор наилучшего решения с набором оптимальных параметров. От количества критериев оптимальности зависит, насколько полная характеристика об объекте исследования будет получена.

Большинство методов решения задач многокритериальной оптимизации сводят множество частных критериев оптимальности к одному показателю эффективности (Парето-оптимальные решения)[5]. И это понятно, т.к. введение обобщенного критерия вместо ряда частных критериев означает решение задачи. Поскольку есть множество методов для решения однокритериальных задач оптимизации) [6,7,8]. Благодаря введению целевой функции логические проблемы перестают существовать, остаются лишь трудности, связанные с вычислением. Наиболее распространенным обобщенным критерием оптимальности ( $F(x)$ ) является сумма частных критериев эффективности, называемая аддитивной свёрткой (1).

$$F(x) = (a_1F_1(x) + a_2F_2(x) + \dots + a_iF_i(x)) \quad (1)$$

где  $F_i(x)$  - частные критерии эффективности;

$a_i$  - «весовые» коэффициенты или меры важности частных критериев.

Для упрощения процедуры назначения «весов»  $a_i$  критериям накладывается ограничение вида:

$$\Sigma a_i = 1. \quad (2)$$

Частные критерии оптимальности довольно часто между собой несопоставимы и имеют различное направление оптимизации. Поэтому производят их нормализацию, т.е. осуществляют переход к условным единицам измерения критериев и ориентируют желаемое направление их изменения. Нормализация критериев производится по формулам:

$$F(x) = \begin{cases} \frac{F_i - F_{min}}{F_{max} - F_{min}} \text{ при } F_i \rightarrow \max \\ \frac{F_{max} - F_i}{F_{max} - F_{min}} \text{ при } F_i \rightarrow \min \end{cases} \quad (3)$$

В большинстве случаев «вес» частных критериев эффективности назначают посредством интуитивного представления экспертов. Поскольку такое определение «весовых» коэффициентов в этом случае носит субъективный характер, иногда применяют формальный метод их назначения. Для каждого частного критерия оптимальности вычисляется коэффициент относительного разброса по формуле:

$$d_i = \frac{F_i^{max} - F_i^{min}}{F_i^{max}} \quad (4)$$

«Весовые» коэффициенты определяются по выражению:

$$a_i = \frac{d_i}{\Sigma d_i} \quad (5)$$

#### **Задача оптимизации люковых закрытий**

Рассмотрим задачу многокритериальной оптимизации люковых закрытий, применяемых на современных судах. Были приняты к рассмотрению три показателя их эффективности:

- 1) критерий массы металла;



- 2) критерий стоимости люковых закрытий;
- 3) критерий времени, затрачиваемого на открытие/закрытие одного трюма.

В качестве критерия массы наиболее правильно было бы использовать не значения самой массы металла, применяемой для изготовления люковых крышек, а его относительное значение, поскольку суда имеют существенные отличия в размерениях, водоизмещении, дедейте, объёмах грузовых трюмов и пр. Поэтому в качестве этого критерия принято отношение массы крышек к кубатуре грузовых трюмов. Исходная масса крышек принята по спецификациям рабочей конструкторской документации ряда проектов судов.

Значение критерия стоимости люковых закрытий принято исходя из стоимости металла руб./кг или тыс. руб./т на момент 2021 года в зависимости от конкретного поставщика металла [9, 10]. При этом для определения критериев принято относительное значение стоимости металла от его массы.

Открытие и закрытие люковых крышек в зависимости от их типов осуществляется различными способами, к примеру, с помощью гидроцилиндров или же мостового или берегового крана, специальных лебедок. Среднее время, которое требуется на открытие/закрытие люковых закрытий, фиксируется во время проведения испытаний тем или иным способом.

Результаты расчётов критериев различных типов люковых закрытий представлены в таблице 1.

*Таблица 1*

**Сопоставление типов люкового закрытия по критериям**

Параметр	Типы люкового закрытий сухогрузных судов				
	Съёмные	Шарнирно-откидные	Откаты-ваемые	Сдвигаемые	Наматы-ваемые
1 Критерий массы, т/м <sup>3</sup>	0,0196	0,0192	0,0237	0,0222	0,0297
2 Критерий стоимости, тыс. руб./т	0,0675	0,0757	0,0679	0,0667	0,0526
3 Критерий среднего времени, затрачиваемого на открытие / закрытие одного трюма, мин	20,0000	15,0000	15,0000	25,0000	45,0000

Нормализация критериев произведена по формулам (3). Результат расчёта нормализации критериев, а также значения «весовых» коэффициентов представлены в таблице 2.

*Таблица 2*

**Нормализация критериев люковых закрытий**

Параметр	Значение критериев люковых закрытий					$a_i$
	Съёмные	Шарнирно-откидные	Откаты-ваемые	Сдвигаемые	Наматы-ваемые	
Масса	0,962	1,000	0,571	0,714	0,000	0,265
Стоимость	0,355	0,000	0,338	0,390	1,000	0,229
Время	0,833	1,000	1,000	0,667	0,000	0,501

Результаты расчетов обобщенного показателя эффективности для разных типов люковых закрытий представлены в таблице 3.

Таблица 3

**Сводные данные решения многокритериальной оптимизации методом обобщённого показателя**

Типы люковых закрытий				
Съёмные	Шарнирно-откидные	Откатываемые	Сдвигаемые	Наматываемые
$F(x) = \Sigma(a_i F_i(x))$				
0,758	0,770	0,733	0,616	0,230

**Задача оптимизации шлюпочного устройства**

Для шлюпочного устройства в качестве частных критериев рассматривались такие, как критерий стоимости, критерий времени подъёма/спуска шлюпки, критерий массы; критерий вместимости. Рассмотрим каждый из них в отдельности. В таблицах 4 и 5 приведен сравнительный анализ шлюпок и шлюпбалок по каждому из частных критериев оптимальности.

Таблица 4

**Сравнительный анализ критериев оптимальности шлюпок**

Параметр	Вид шлюпки		
	Открытая (ОСШ)	Частично закрытая (ЧЗСШ)	Полностью закрытая (ПЗСШ)
Стоимость, \$	<b>От 1000 до 20000</b>	От 2000 до 50000	От 1800 до 70000
Масса, т	8,5	9,9	<b>7,5</b>
Вместимость, чел.	<b>32</b>	35	<b>32</b>

Таблица 5

**Сравнительный анализ критериев оптимальности шлюпбалок**

Параметр	Вид шлюпбалки		
	Гравитационная	Заваливающаяся	Поворотная
Время подъёма/спуска шлюпки, мин	12-15	14-16	<b>9-12</b>
Стоимость, \$	От 6500 до 80000	<b>От 2000 до 50000</b>	От 1500 до 75000
Масса, т	10	8,7	<b>6,1</b>

Характеристикой критерия стоимости является рыночная стоимость шлюпок и шлюпбалок, выбор каждой из них зависит от типа судна, его района плавания, назначения, габаритов, количества экипажа (и пассажиров, если это пассажирский лайнер).

Исходя из табличных данных (таблица 4) по стоимости шлюпок, можно сделать вывод, что наиболее целесообразно, если нет особых требований, покупать открытые шлюпки, т.к. они наиболее дешевы как в эксплуатации, так и в ремонте. Также можно сделать вывод, что касательно стоимостного критерия более целесообразно использовать поворотные шлюпбалки (таблица 5).

Критерий времени подъёма/спуска шлюпки характеризует время (минуты), за которое осуществляется спуск шлюпки на воду с учетом посадки людей.

Исходя из табличных данных (таблица 4) можно сделать вывод о том, что по времени спуска для грузовых судов наиболее рационально будет выбрать поворотную

шлюпбалку. Для пассажирских судов время спуска спасательной шлюпки примерно в 3 раза больше из-за количества людей на корабле.

Критерий массы определяется в зависимости от габаритов и вместимости шлюпок, то есть является обобщенным.

В шлюпках, в зависимости от габаритов и типа, имеется фиксированное количество мест для людей. Исходя из данных, приведенных в таблице 4, можно сделать вывод, что открытые спасательные шлюпки более вместительны, но стоит отметить то, что на крупных судах как морских, так и смешанного плавания в основном применяют полностью закрытые шлюпки в качестве основных. Открытые же применяют в основном на маломерных речных судах и в качестве дежурных шлюпок на больших судах. На пассажирских судах стараются применять шлюпки с наибольшей вместимостью, в соответствии с Правилами Российского Речного Регистра и другими международными документами.

В силу того, что рассмотренные критерии между собой несопоставимы, необходимо произвести их нормализацию, то есть перейти к условным единицам измерения (3). Результат расчёта нормализации критериев и значения «весовых» коэффициентов представлены в таблице 6 и таблице 7.

В таблице 8 сведены результаты расчёта многокритериальной оптимальности способом обобщённого критерия эффективности для шлюпок.

Таблица 6

**Нормализация критериев для шлюпок**

Параметр	Значения критериев			$a_i$
	Открытая (ОСШ)	Частично закрытая (ЧЗСШ)	Полностью закрытая (ПЗСШ)	
Масса	0,001	0,998	0,416	0,232
Стоимость	0,426	0,001	0,375	0,686
Вместимость	0,005	0,989	0,276	0,082

Таблица 7

**Нормализация критериев для шлюпбалок**

Параметр	Значения критериев			$a_i$
	Гравитационная	Заваливающаяся	Поворотная	
Масса	0,006	0,995	0,578	0,324
Стоимость	0,375	0,416	0,994	0,312
Время подъёма/спуска шлюпки	0,997	0,321	0,002	0,364

Таблица 8

**Сводные данные решения многокритериальной оптимальности способом обобщённого критерия эффективности для шлюпок**

Тип шлюпки		
Открытая (ОСШ)	Частично закрытая (ЧЗСШ)	Полностью закрытая (ПЗСШ)
$H(x) = \sum(a_i H_i(x))$		
0,293	0,313	0,377

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что в данном случае следует применять шлюпки полностью закрытого типа.

В таблице 9 сведены результаты расчёта многокритериальной оптимальности способом обобщённого показателя для шлюпбалок.

Таблица 9

**Сводные данные решения многокритериальной оптимальности способом обобщённого показателя для шлюпбалок**

Тип шлюпки		
Гравитационная	Заваливающаяся	Поворотная
$H(x) = \Sigma(a_i H_i(x))$		
0,482	0,247	0,633

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что следует применять поворотную шлюпбалку.

**Заключение**

Метод оптимальных решений, упомянутый в статье, показал, что наиболее целесообразно применять шарнирно-откидные люковые закрытия. Рассматривая частные критерии эффективности, такие как масса, стоимость, вместимость, оптимальным решением оказалась шлюпка полностью закрытого типа. А наиболее приемлемый поворотный тип шлюпбалки был выбран по трем критериям: масса, стоимость и время подъема/спуска шлюпки.

Полученные результаты решения задач многокритериальной оптимизации позволяют сделать вывод о возможности применения рассмотренного метода аддитивной свертки частных критериев эффективности для выбора типа судовых устройств. Однако следует отметить, что при решении подобных задач необходимо также учитывать такие факторы, как назначение и условия эксплуатации судна, многолетний опыт эксплуатации различных типов устройств, которые не всегда удается включить в алгоритм в формализованном виде.

**Список литературы**

1. Шмаков М. Г. Судовые устройства. Учебник для вузов водн. трансп. Изд. 2-е, перераб. и доп. «М», «Транспорт», 1977, 279 с.
2. Зарецкий В. М., Лесовой В. А. Эксплуатация судовых устройств и корпуса: Учебник для мореход. училищ. – М., Транспорт. 1990. – 260 с.
3. Очеретянный А. В. Судовые люковые закрытия. Методические указания к практическому занятию. – Севастополь: Издв-во СевНТУ. 2009. – 24 с.
4. Симоненко А. С. Грузовые устройства сухогрузных судов. – Л.: Судостроение, 1988. – 224 с., ил.
5. Шевченко Д. В. Методы оптимальных решений: практикум / Д. В. Шевченко, З. Ш. Аглямова. – Казань: Изд-во «Познание» Казанского инновационного университета им. В. Г. Тимирязова (ИЭУП), 2018. – 149 с.
6. Коротченко А. Г., Кумагина Е. А., Сморякова В. М. Введение в многокритериальную оптимизацию. Учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский университет, 2017. – 55 с.
7. Мастяева И. Н., Горемыкина Г. И., Семенихина О. Н. Методы оптимизации: линейные модели. М.: МЭСИ, 2015.
8. Соболев И. М., Статников Р. Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Дрофа, 2006. 175 с.

9. Металл сервис. Каталог судовой стали – URL: [https://mc.ru/metalloprokat/sudovaya\\_stal](https://mc.ru/metalloprokat/sudovaya_stal). (дата обращения 09.03.2022).
10. ТД МегаСталь. Металлопрокат - URL: <https://mgstl.ru/>. (дата обращения 09.03.2022).

#### References

1. Shmakov M. G. Ship devices. Textbook for woods aq. transp. Ed. 2nd, revised. and additional "M", "Transport", 1977. - 279 p.
2. Zaretsky V. M., Lesovoy V. A. Operation of ship devices and hulls: A textbook for a sailor. schools. - M., Transport, 1990. - 260 p.
3. Ocheretyanny A. V. Ship hatch covers. Methodical instructions for a practical lesson. - Sevastopol: SevNTU Publishing House, 2009. - 24 p.
4. Simonenko A. S. Cargo devices for dry cargo ships. - L.: Shipbuilding, 1988. - 224 p., ill.
5. Shevchenko D. V. Methods of optimal solutions: practical work / D. V. Shevchenko, Z. Sh. Aglyamova. - Kazan: Publishing House "Knowledge" of the Kazan Innovative University. V. G. Timiryasova (IEUP), 2018. - 149 p.
6. Korotchenko A. G., Kumagina E. A., Smoryakova V. M. Introduction to multicriteria optimization. Teaching aid. - Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod University, 2017. - 55 p.
7. Mastyaeva I. N., Goremykina G. I., Semenikhina O. N. Optimization methods: linear models. M.: MESI, 2015.
8. I. M. Sobol and R. B. Statnikov, Choice of Optimal Parameters in Problems with Many Criteria. M.: Drofa, 2006. - 175 p.
9. Metal service. Marine steel catalog - URL: [https://mc.ru/metalloprokat/sudovaya\\_stal](https://mc.ru/metalloprokat/sudovaya_stal). (accessed 09.03.2022).
10. Trade House MegaStal. Rolled metal - URL: <https://mgstl.ru/>. (accessed 09.03.2022).

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

**Зорин Александр Андреевич**, магистрант кафедры проектирования и технологии постройки судов, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: [sanya.zorin.1998@mail.ru](mailto:sanya.zorin.1998@mail.ru)

**Alexander A. Zorin**, master student of the Department of Design and Technology of Building Ships, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

**Миролюбов Дмитрий Алексеевич**, магистрант кафедры проектирования и технологии постройки судов, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: [mirolubow.d@mail.ru](mailto:mirolubow.d@mail.ru)

**Dmitry A. Mirolubov**, master student of the Department of Design and Technology of Building Ships, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

**Кузнецова Вера Владимировна**, к.т.н., доцент кафедры проектирования и технологии постройки судов, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: [anis88vera@mail.ru](mailto:anis88vera@mail.ru)

**Vera V. Kuznetsova**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Design and Technology of Building Ships, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 21.04.2022; опубликована онлайн 07.06.2022.  
Received 21.04.2022; published online 07.06.2022.

УДК [005.52:005.334]:519.2/.6]:[658.512:622.276.04]  
DOI: 10.37890/jwt.vi71.251

## **Методика оценки рисков на стадии концептуального проектирования объектов морской техники при обустройстве морских месторождений**

**О.А. Иванова**<sup>1,2</sup>

*ORCID: 0000-0002-3034-0968*

**А.В. Родькина**<sup>2</sup>

*ORCID: 0000-0002-4593-4259*

<sup>1</sup>*АО «ЦКБ «Коралл», г. Севастополь, Россия*

<sup>2</sup>*Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия*

**Аннотация.** В статье выполнена качественная оценка риска с учетом разработанной шкалы «Вероятность/частота» и с использованием «Классификатора последствий» для нескольких вариантов обустройства месторождения. «Классификатор категорий последствий» учитывает экологические, финансовые критерии риска и критерии риска, связанные с жизнью, здоровьем и сроками, влияющими на реализацию строительства и эксплуатацию. Анализ рисков выполнен с учетом существующей нормативной документации и на основе анализа причин возникновения факторов, определяющих исходы аварий, учитывая все особенности рассматриваемых случаев для этапов жизненного цикла: Проведение опытно-конструкторских работ, Производство и испытания, Использование (эксплуатация). На основании вычисления рангового коэффициента Кендалла выполнена оценка степени согласия при выполнении работы группы экспертов. По результатам выполненных расчетов в категориях риска были определены, одновременно для всех рассматриваемых объектов обустройства месторождения, подкатегории. На основании разработанной шкалы «Вероятность/частота» и разработанного «Классификатора категорий последствий» составлен реестр риска. В реестр риска вошли 72 риска и в результате расчетов определен «Индекс риска». В итоге, по результатам качественной оценки рисков разработана «Матрица рисков» на основании методики, представленной в Правилах Регистра. При этом использовалась модель Alagr или принцип разумной достаточности. Данная оценка рисков позволяет определить: степень важности риска, расставить приоритеты для разных категорий рисков, выбрать оптимальный вариант, имеющий наименьший «Индекс риска».

**Ключевые слова:** анализ, критерии, оценка риска, буровая платформа, сооружения, вероятность, уровни иерархии, матрица.

## **Methodology for risk assessment at the conceptual design stage of offshore structures during the offshore fields development**

**Olga A. Ivanova**<sup>1,2</sup>

*ORCID: 0000-0002-3034-0968*

**Anna V. Rodkina**<sup>2</sup>

*ORCID: 0000-0002-4593-4259*

<sup>1</sup>*«Corall» JSC, Sevastopol, Russia*

<sup>2</sup>*Sevastopol State University, Sevastopol, Russia*

**Abstract.** The qualitative risk assessment taking into account the developed scale "Probability / frequency" and using "The Classifier of consequences" for several options for the offshore fields development has been carried out in the article. "The Consequence Category Classifier" takes into account environmental, financial, life, health and time risk criteria affecting construction and operation. The risk analysis was carried out taking into account the existing regulatory documentation and based on the analysis of the causes of the occurrence of factors that determine the outcomes of accidents, taking into account all the features of the cases under consideration for the life cycle stages: Design work, Production and testing, Use (operation). The degree of agreement in the performance of the experts group work was made based on the calculation of the Kendall rank coefficient. Subcategories were determined simultaneously for all the considered field development facilities according to the results of the performed calculations in risk categories. The Risk register was compiled based on the developed scale "Probability/Frequency" and the developed "Classifier of Consequence Categories". The risk register included 72 risks. The "Risk Index" was determined as a result of calculations. Finally, based on the qualitative risk assessment results, a "Risk Matrix" was developed based on the methodology presented in the Register Rules. The Alarp model or the principle of reasonable sufficiency was used. This risk assessment allows to determine: the degree of the risk importance, prioritize different categories of risks, choose the best option with the lowest "Risk Index".

**Keywords:** analysis, criteria, risk assessment, drilling platform, offshore structures, probability, hierarchy levels, matrix.

### **Введение**

Рассмотрение основных тенденций развития технологии освоения глубоководных и мелководных месторождений нефти и газа связано непосредственно с государственной программой Российской Федерации «Развитие судостроения и техники для освоения шельфовых месторождений на 2013-2030 годы» [1].

Решаемая научная проблема заключается в создании комплекса проектных решений по техническим средствам, предназначенным для освоения как мелководных, так и глубоководных участков шельфа на стадии концептуального проекта. Большинство трудностей и неопределенностей, возникающих на концептуальной стадии проектирования при разработке морского месторождения, обусловлено низкой степенью изученности геологических и природно-климатических условий [2]. Кроме того, все решения по обустройству месторождения не должны противоречить рекомендациям, изложенным в Градостроительном кодексе, так как объекты по обустройству морского месторождения будут связаны с береговой инфраструктурой. Согласно Градостроительному кодексу данный этап является этапом предпроектной проработки. Целями данного этапа является обоснование размещения новых зданий, сооружений или реконструкции объектов береговой инфраструктуры. Предпроектный анализ включает сбор и систематизацию необходимой градостроительной и связанной с ней социальной, демографической, экономической, экологической и другой информацией; визуальный осмотр местности; выполнение необходимых обмеров, зарисовок местности или фотофиксация, что является важной частью при проектировании. Все проектные решения, принятые в работе направлены на обеспечение круглогодичной эксплуатации нефтегазовых месторождений в тяжелых природно-климатических условиях и выявление тенденций инновационных подходов в проектировании оффшорных сооружений.

Работы по обустройству участков нефтегазовых месторождений характеризуются высокой степенью экологических, финансовых и экономических рисков, связанных с расположением основных морских путей и заповедников, и курортов в непосредственной близости от объектов проектирования. Будущие результаты при

реализации таких проектов зависят от множества факторов, которые приводят к возникновению риска того, что аварии при эксплуатации объекта могут нанести значительный ущерб не только РФ, но и другим прибрежным государствам. Объектам обустройства, разрабатываемым нефтегазовым морским месторождениям по добычи недр, присваивается второй класс опасности [9].

Организации, эксплуатирующие опасные производственные объекты второго класса опасности, обязаны создать системы управления промышленной безопасностью и обеспечивать их функционирование, планировать и осуществлять мероприятия по локализации и ликвидации последствий аварий на опасном производственном объекте.

Уровень ответственности объектов обустройства разрабатываемых нефтегазовых участков по добыче недр определяется в соответствии с объемом экономических, социальных и экологических последствий их разрушения и с учетом отнесения нефтегазодобывающих платформ к опасным производственным объектам в соответствии с Федеральным законом от 30.12.2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», как повышенный [9].

Снижение рисков и обеспечение промышленной безопасности проектируемых объектов обеспечивается за счет выполнения требований международных Конвенций и Правил, с учетом национальных и региональных законов, регламентов и нормативных документов Российской Федерации, а также требований Правил Регистра и Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности.

На оценку эффективности инвестиционных проектов при разработке морских месторождений значительное влияние оказывает анализ рисков проекта [3]. В связи с этим целью статьи является разработка методики оценки рисков на стадии концептуального проектирования объектов морской техники при обустройстве морских месторождений.

#### **Разработка критериев риска. Сравнительная оценка риска**

Критерии риска должны отражать цели и область применения и должны быть приняты на стадии концептуального проектирования в соответствии с интересами причастных сторон и соответствующими законодательными и/или обязательными требованиями. Критерии риска могут быть эксплуатационными, техническими, финансовыми, юридическими, законодательными, социальными, экологическими, гуманитарными. Общее описание критериев принятия решений должно быть разработано при установлении области применения менеджмента риска. После идентификации конкретного вида риска и выбора метода анализа риска уточняются и/или перерабатываются критерии риска в соответствии с типом риска и способом его представления. На основании принятых критериев риска составляется реестр риска [4].

Риски порождаются неопределенностью будущих результатов и в общем виде определяются четырьмя основными факторами: отсутствием информации; принятием или отменой действий конкурентов и других контрагентов; случайной реализованностью факторов, известных на момент принятия решений; появлением новых факторов неизвестных на момент принятия решения [5].

Результаты предварительного анализа риска использованы для выбора предпочтительного варианта освоения участка по добычи недр и не оценивают приемлемость уровня риска для конкретного персонала, конкретных объектов проекта, конкретного социума и составляющих окружающей среды.

При анализе и оценке риска рассмотрены опасности/риски этапов жизненного цикла: Проведение опытно-конструкторских работ (ОКР), Производство и испытание



(включает закупки, морские операции, пуско-наладку, сдачу и запуск в эксплуатацию), Использование (эксплуатация) – включает капитальные ремонты, техническое перевооружение). Этапы «Обоснование разработки», «Разработка технического задания», «Модернизация» и «Утилизация» в настоящей работе не рассматривались.

В качестве объекта исследования было принято месторождение, находящееся на шельфе Черного моря в пределах исключительной экономической зоны РФ и континентального шельфа РФ. Глубина моря в пределах рассматриваемого месторождения до 100 м.

Для концептуального проекта концепция обустройства должна быть выполнена с учетом

- природно-климатических и инженерно-геологических условий участка;
- наличия в пределах и вблизи участка зон ограничения мореплавания, а также участков с запретом на выполнение работ, связанных с касанием дна по информации из открытых источников.

Для этого в работе была выполнена предварительная оценка вариантов обустройства месторождения и выполнена оценка рисков [5, 18, 19].

В рамках работы были определены несколько возможных вариантов технических решений объектов бурения с учетом береговой инфраструктуры.

Каждый из вариантов обустройства имеет свои специфические особенности, влияющие на риски и безопасность эксплуатации объектов, а также положительные и отрицательные стороны. Этап сравнительной оценки риска состоит в оценке приемлемости риска на основе критериев риска, ранжировании опасных событий и составлении перечня опасных событий, для которых необходимо проведение обработки риска. Сравнительная оценка риска выполнена в соответствии с [6].

Анализ возможности аварийных ситуаций представляет собой ряд мер, направленных на сведение к минимуму вероятности и последствий аварий на месторождении. Анализ проведен по всему спектру рисков, с учетом специфических особенностей для каждого рассмотренного варианта. Последствиями аварий на морских нефтегазодобывающих объектах, значительно влияющих на затраты, могут являться: загрязнение моря нефтью/нефтепродуктами; остановка работ по бурению или добыче; повреждение оборудования на объекте; повреждение самого объекта; гибель персонала [21, 25-28].

Затраты на ликвидацию загрязнения моря нефтью включают не только затраты на непосредственно сбор нефти, но и оплату экологического ущерба [32].

На основании выполненного анализа и доступных в открытой печати сведений об авариях, происшедших на морских буровых сооружениях различного типа [33], с учетом основных специфических опасных факторов и рисков, которые присутствуют при реализации различных вариантов обустройства месторождений, была дана экспертная оценка влияния факторов и рисков на эффективную реализацию проекта, позволяющая сопоставить результаты и выбрать предпочтительный с точки зрения риска вариант в зависимости от уровня риска. Для целей настоящего анализа применена классификация категорий рисков, типичная для проектов оффшорного бурения, приведенная в таблице 1.

Таблица 1

**Классификация категорий рисков**

№	Категория риска	№	Подкатегории риска
1	Риски внешней природной среды	1.1.	Климатические и погодные
		1.2.	Геологические
2	Рыночные риски	2.1.	Контрактные
		2.2.	Санкционные
3	Эксплуатационные риски	3.1.	Транспортные и логистические
		3.2.	Риски материально-технического снабжения
		3.3.	Технологические
		3.4.	Риски техногенных аварий
		3.5.	Риски строительства
		3.6.	Человеческий фактор
		3.7.	Качество материалов и оборудования
		3.8.	Риски ликвидации
4	HSE риски	4.1.	Экологические
		4.2.	Риски безопасности и охраны труда
		4.3.	Социальные
5	Риски планирования	5.1.	Инженерные и научные изыскания
		5.2.	Планирование и проектирование

**Методы экспертных оценок**

При оценке рискованных решений в процессе управления рисками большое значение имеет учет сущности и содержания в зависимости от сферы деятельности, специфики и особенностей принятия рискованных решений. Важную роль имеет как фундаментальный анализ соотношения понятий риска и неопределенности, так и специфика, и особенности теории и методов управления рисками, которые формируются в зависимости от рассматриваемого объекта.

Существуют как качественные, так и количественные методы оценки эффективности, требования и рекомендации к которым регламентируются нормативной документацией [7, 8]. Одним из часто применяемых методов оценки рисков является метод экспертных оценок. Подробная количественная оценка, в том числе с точки зрения выработки мероприятий смягчения и устранения последствий сценарных событий, проводится на последующем этапе реализации проекта – стадии разработки проектной документации в соответствии с [9, 18].

В работе выполнена качественная оценка риска с учетом разработанной шкалы «Вероятность/частота» и с использованием «Классификатора последствий». Анализ выполняется на основе анализа причин возникновения и факторов, определяющих исходы аварий, учитывая все особенности рассматриваемых случаев.

Качественный анализ был применим из-за отсутствия и дефицита данных об объектах и условиях на этапе концептуального проектирования. Качественный анализ носит описательный характер и определяет только состав без указания на количественное соотношение компонентов. Т.е. определяет степень важности риска, помогает расставить приоритеты для разных категорий рисков. Такой анализ позволяет подготовить информацию для количественного анализа риска.

В данной работе применялся метод «мозгового штурма». Для стимулирования свободного обсуждения все участники имели примерно одинаковый статус. В группу участников входили 8 экспертов, имеющие разный взгляд на ситуацию и проект в целом – руководители различных подразделений. Для создания свободной дискуссии из участников «мозгового штурма» были исключены руководители высшего уровня, чтобы не происходило сдерживание выдвигаемых идей подчиненных. Во время дискуссии была обеспечена запись всех суждений при полном отсутствии их обсуждения и критики. При этом высказывающий идею эксперт, по желанию, давал кратко ее пояснение [10].

Сгенерированные идеи были обработаны и проанализированы. Идентифицированные риски сгруппированы, а повторяющиеся по сути риски были удалены. Далее выполнено укрупнение идентифицированных рисков в группы. На данной стадии концептуального проекта результатом процесса «мозгового штурма» стал список рисков, из которого далее сформирован реестр риска.

Степень согласия группы экспертов оценивалась с помощью коэффициента конкордации  $W$  для подкатегорий рисков в каждой категории рисков, представленных в таблице 1.

Коэффициент конкордации  $W$  может быть определен по методике, прописанной в Правилах Регистра [11]:

$$W = \frac{12 \cdot \sum_{i=1}^{i=n} \left\{ \sum_{j=1}^{j=n} x_{ij} - \frac{1}{2} m \cdot (n + 1) \right\}^2}{m^2 (n^3 - n)}, \quad (1)$$

где

$m$  – число объектов экспертизы;

$n$  – число экспертов;

$x_{ij}$  – рассматриваемые свойства.

Коэффициент конкордации  $W$  изменяется от 0 до 1. Если  $W = 0$  это означает, что не существует связи между ранжированием экспертов;  $W = 1$  означает, что все эксперты одинаково ранжируют объекты по данному признаку.

Так как число ранжируемых факторов больше двух, то для измерения тесноты связи между ними использовался предложенный М. Кендаллом и Б. Смитом коэффициент конкордации (множественный коэффициент ранговой корреляции). В работе степень согласия работы экспертов определена на основании вычисления рангового коэффициента Кендалла – коэффициента конкордации, который представляет отношение отклонения суммы квадратов рангов от средней суммы квадратов рангов, умноженного на 12, к квадрату экспертов, умноженных на разницу между кубом числа объектов и числом объектов [12].

Фрагмент вычисления коэффициента конкордации приведен для категории эксплуатационных рисков, включающих в себя 8 подкатегорий для рассматриваемых объектов обустройства месторождения: морской стационарной платформы (МСП); блок-кондуктора (БК) и самоподъемной буровой установкой (СПБУ); плавучей системы нефтедобычи, хранения и отгрузки (FPSO) и подводного добычного комплекса (ПДК); СПБУ и ПДК.

Оцениваем среднеарифметическое число рангов подкатегорий риска:

$$\bar{r} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k r_i \quad (2)$$

где  $\bar{r}$  – среднее математическое ожидание;

$k$  – число объектов;

$r_i$  – ранг подкатегории риска.

Оцениваем сумму квадратов отклонений от среднего  $S$  :

$$S = \sum_{i=1}^k (r_i - \bar{r})^2 \quad (3)$$

где  $S$  – сумма квадратов отклонений всех оценок рангов каждого объекта экспертизы от среднего значения.

Определяем коэффициент конкордации  $W$  :

$$W = \frac{12S}{n^2(m^3 - m)} \quad (4)$$

где  $n$  – число экспертов;

$m$  – число объектов экспертизы.

Формула (4) применяется для случая, когда ранги по каждому признаку не повторяются. Если же есть связанные ранги, то коэффициент конкордации рассчитывается с учетом числа таких повторяющихся рангов по каждому фактору.

Коэффициент  $W$  показывает зависимость между двумя переменными, и в большинстве случаев называется ранговым коэффициентом корреляции Кендалла.

Определяем коэффициент конкордации  $W$  :

$$W = \frac{12S}{n^2(m^3 - m) - n \sum_1^n (t^3 - t)} \quad (4)$$

где

$n$  – число экспертов;

$m$  – число объектов экспертизы;

$t$  – число одинаковых рангов по каждому признаку

Для определения коэффициента конкордации необходимо определить для каждой подкатегории рисков, имеющей повторяющиеся ранги,  $(t^3 - t)$  следующим образом:

- транспортные и логистические риски имеют 4 повторяющихся ранга (5; 5; 5;5):

$$(t^3 - t) = (4^3 - 4) = 60 ;$$

- риски материально-технического снабжения имеют три повторяющихся ранга (0,2; 0,2;0,2); два повторяющихся (0,5 и 0,5) и два повторяющихся ранга (1и1):

$$(t^3 - t) = (3^3 - 3) + (2^3 - 2) + (2^3 - 2) = 12 \text{ и т.д.}$$

Степень согласия группы экспертов оценивалась с помощью коэффициента конкордации  $W$  для подкатегорий рисков в каждой категории рисков, представленных в таблице 2. Расчетный коэффициент конкордации находится в пределах  $W \geq 7$  для всех категорий риска. Расчетное значение сопоставляется с нормативным значением, приведенным в п.3.4, таблице 3.4.2 [11] и показывает степень «приемлемого согласия» и «хорошее согласие» работы экспертов.

Таблица 2

Определение коэффициента конкордации

Номер объекта экспертизы	Эксплуатационные риски (оценка эксперта)								Сумма
	Транспортные и логистические	Риски материально-технического снабжения	Технологические	Риски техногенных аварий	Риски строительства	Человеческий фактор	Качество материалов и оборудования	Риски ликвидации	
1	4,5	0,2	4	0,6	1	5	5	1	
2	5	0,5	5	0,5	0,5	5	4	0	
3	5	1	5	1	0,2	5	5	1	
4	4	0,4	4	0,2	0,2	5	4	1	
5	5	1	4	0,4	0,1	5	5	0	
6	5	0,5	4	0,3	1	5	5	1	
7	3	0,2	5	1	1	5	4	1	
8	3,5	0,2	5	1	0	5	4	0	
$\sum r_{is}$	35	4	36	5	4	40	36	5	165,00
$\bar{r}$									20,63
$\sum r_i - \bar{r}$	14,38	-16,63	15,38	-15,63	-16,63	19,38	15,38	-15,63	
$\sum (r_i - \bar{r})^2$	206,64	276,39	236,39	244,14	276,39	375,39	236,39	244,14	$S = 1859,48$
$\sum (t^3 - t)$	60	12	120	24	18	504	120	144	1002
$W$									0,92

Рейтинг выставляемый экспертами от 0 до 5 баллов. Фрагмент определения коэффициента конкордации приведен только для одного объекта обустройства месторождения для варианта блок-кондуктора и самоподъемной буровой установкой.

В результате проведенных исследований выполнена оценка согласованности работы группы экспертов при определении подкатегорий рисков для каждого рассматриваемого объекта. По результатам выполненных расчетов в категориях риска

были определены для всех рассматриваемых объектов обустройства месторождения (морской стационарной платформы (МСП); блок-кондуктора и самоподъемной буровой установкой (СПБУ); плавучей системы нефтедобычи, хранения и отгрузки (FPSO) и подводного добычного комплекса (ПДК); СПБУ и ПДК) подкатегории риска, которые будут внесены в реестр риска, остальные подкатегории были исключены из реестра риска.

Данный метод экспертных оценок на стадии концептуального проекта является объемным и трудоемким при рассмотрении более пяти категорий рисков и нескольких вариантов объектов обустройства морского месторождения. Для снижения трудоемкости данного метода необходимо расширить перечень исходных данных, например, выбрать тип буровой техники, применяемой для обустройства морского месторождения.

### **Идентификация опасностей**

Идентификация опасных для включения в реестр риска событий должна включать в себя определение явлений и событий, воздействующих на объекты реестра риска, установленные в области применения реестра риска, требования регламентируются п.4.2 [13]. Авторами был определен перечень опасных событий неблагоприятно или даже критически влияющих на достижение цели при обустройстве месторождения.

Исследования по идентификации опасностей при реализации вариантов оснащения объектами обустройства месторождения проводятся с целью определения максимально возможного числа опасных факторов, что позволит выбрать вариант обустройства с учетом обеспечения безопасности и экономической эффективности.

Задача состоит в том, чтобы идентифицировать список опасностей и связанных сценариев, расположенных по приоритетам уровней риска, определенных для рассматриваемой проблемы. Поставленная задача достигается преимущественно на основании применения стандартных методов для идентификации опасностей, которые могут поспособствовать несчастным случаям [14, 22].

Основными параметрами риска являются:

- размер возможного ущерба, наступающего в результате наступления опасного события;
- показатель вероятности наступления опасного случая;
- показатель возможных расходов, связанных с ликвидацией последствий опасного события и восстановления прежнего положения;
- стоимость упущенной выгоды. В этом случае риск характеризуется субъективной оценкой вероятной, ожидаемой величины максимального дохода в случае использования альтернативного варианта;
- степень не благоприятности последствий от наступления опасного события.

Подход, используемый для идентификации опасности, включает комбинацию и творческих и аналитических методов, чтобы идентифицировать все соответствующие опасности. Примеры опасностей, относящихся к корабельным операциям, представлены в [14, 15].

Морской Комитет Безопасности разрабатывает и принимает руководящие принципы для Формальной Оценки Безопасности (ФОБ). ФОБ является структурированной и систематической методологией, нацеленной на усиление безопасности на море, включая защиту жизни, здоровья, морской среды и собственности, при использовании анализа риска и оценки затрат и преимуществ.

Характеристика опасностей и рисков должна быть и качественной, и количественной, и описательной, и математической, совместимой с доступными данными, и должна быть достаточно широкой, чтобы включать всесторонний диапазон вариантов оценки рисков.

На начальной стадии проектирования при минимальном количестве исходных данных для достижения ценных результатов может применяться экспертная оценка, физическое и аналитическое моделирование. Но в приоритете должны быть рассмотрены те данные, которые уже доступны (например, несчастный случай и статистические данные) [14, 16].

Способы представления последствий и вероятности событий в реестре риска выбираются с обязательным обеспечением выполнения целей анализа риска.

При проведении анализа риска учитываются неопределенность и изменчивость оценок последствий и вероятности события, эффективность обмена информацией о риске.

Перечень опасных, неблагоприятно влияющих на деятельность и достижение целей, событий разрабатывается и принимается на основании классификации опасностей из [13].

В работе была разработана шкала «Вероятность/частота» с учетом существующей типовой шкалы приведенной в Правилах Регистра [11] с учетом статистики аварий, происходящих на буровых платформах 2005–2015 гг. Критерии риска структурированы в понятиях «Вероятность / частота» (таблица 3) и «Категории последствий» (таблица 4).

Источники и причины возникновения опасных событий, а также возможные последствия были рассмотрены после идентификации возможных опасных событий. Качественная оценка риска дана по пятибалльной шкале [6], где очень высокая вероятность возникновения опасного события равна 5 баллам – очень часто (100 %), высокая 4 балла – часто (80 %), средняя 3 балла – возможно (60 %), низкая 2 балла – нечасто (менее 20 %) и очень низкая 1 балл – редко (менее 1 %).

Таблица 3

**Шкала «Вероятность / частота»**

№ категории	Категория вероятности	Описание (характеристика) категории
V1	Редко	Данное рисковое событие возможно, но происходит редко. Известны лишь единичные случаи, произошедшие на аналогичных проектах, за последние 5 лет.
V2	Нечасто	Данное событие происходит довольно редко. Известно о нескольких (до 10) случаях на аналогичных проектах за последние 3 года.
V3	Возможно	Данное рисковое событие не является исключительным для аналогичных проектов. Имеются несколько случаев его реализации в индустрии за последний год. Ожидается, что такое событие может произойти не более 1 раза за весь период реализации проекта.
V4	Часто	Ожидается, что данное рисковое событие может происходить 1–3 раза в год на всем горизонте реализации проекта. Имеются множественные примеры аналогичного рискового события за последний год.

№ категории	Категория вероятности	Описание (характеристика) категории
B5	Очень часто	Данное рисковое событие является очень распространённым в аналогичных проектах. Ожидается, что данное рисковое событие может происходить чаще 3 раз в год за весь период проекта.

Оценка последствий опасного события была описана по пятибалльной шкале [6].

Для анализа последствий применяется классификатор категорий последствий, учитывающий четыре основных фактора: жизнь и здоровье людей; экологический ущерб; финансово-экономический ущерб; задержка реализации проекта.

Таблица 4

**Классификатор категорий последствий**

№ категории	Категория последствий	Описание (характеристика) категории			
		Жизнь и здоровье	Экология	Финансы	Сроки
П1	Заметные	1-2 умеренных случая в год	Узко локализованный ущерб, требуется менее 1 недель на устранение	Ущерб \$100 тыс. -\$1 млн	Задержка от 1 до 3 дней
П2	Существенные	2-10 умеренных случаев за весь проект, или 1 серьезный случай ущерба здоровью	Широко локализованный ущерб, менее 1 мес. на устранение, до 1-2 лет на природное восстановление	Ущерб \$1-5 млн	Задержка от 3 до 7 дней
П3	Умеренные	> 10 умеренных случаев, или > 1 серьезного случая	Большой ущерб экосистемам, требующий 1-3 мес. на устранение, 2-5 лет на природное восстановление	Ущерб \$5-15 млн	Задержка от 7 до 20 дней
П4	Критические	> 10 серьезных случаев или > 1 смертельного случая	Критический локальный или существенный широко локализованный ущерб; до 1 года на устранение, 5-10 лет на природное восстановление	Ущерб \$15-50 млн	Задержка от 20 до 60 дней
П5	Катастрофические	> 30 серьезных случаев или >5 смертельных случаев	Перманентный ущерб экосистеме, более 1 года на устранение, более 10 лет на природное восстановление	Ущерб >\$50 млн	Задержка более 60 дней



Необходимо отметить, что при умеренной категории последствий объектами воздействия опасного события люди не являются. Эти последствия влияют на экономику и инфраструктуру. К заметным последствиям относятся малозначительные последствия, влияющие на социальную среду. Во всех остальных категориях последствий объектами воздействия опасного события являются люди, наряду с экономикой, окружающей средой, социальной средой и инфраструктурой.

При оценке рисков, каждый риск относится к наибольшей из категорий последствий, определенных по вышеперечисленным факторам, представленным в таблице 5.

Последствия идентифицированных опасных событий следует оценивать с точки зрения установленных целей проекта или деятельности организации; при этом необходимо учитывать, что одно опасное событие может иметь несколько последствий. Существует много видов и областей воздействия опасных событий, требующих анализа риска [6, 9].

### **Реестр рисков**

Реестр рисков используется для отслеживания информации об отдельных рисках и управлении ими, а также для документирования. Также реестр рисков применяется для передачи информации о рисках причастным сторонам и выделения особо важных рисков.

Реестр рисков может содержать информацию о данных методах и способах их реализации или ссылаться на другие документы [17, 27].

Разработка реестра требует привлечения квалифицированного персонала. Реестр риска анализируется и пересматривается с периодичностью, установленной высшим руководством организации. Анализ и пересмотр реестра риска должны включать в себя обсуждение проблем, связанных с новыми видами идентифицированного риска и исключением из реестра риска устаревшей информации [6, 25].

В реестре рисков информация представляется в едином формате о рисках как для информирования лиц, подвергающихся риску, так и для тех кто несет ответственность за управление ими. Формируется в бумажном виде или в виде базы данных [17, 29].

Сильные стороны реестров рисков и ограничения, общие требования к определению области применения реестра риска установлены в [13, 17, 22, 24].

При разработке реестра риска информация о различных рисках представляется в сопоставимом формате для определения приоритетности рисков. Категории и подкатегории риска определены в зависимости от их повторяемости (частоты). Сформирован объединенный реестр рисков для каждого варианта обустройства месторождения, включая выявление и качественную оценку.

Таблица 5

Реестр рисков рисков (фрагмент)

№ категории риска	Подкатегория риска	Наименование риска	Оценка риска / вероятность (В) / последствия (П) вариантов обустройства							
			МСП		БК и СПБУ		FPSO и ПДК		СПБУ и ПДК	
			Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3		Вариант 4	
			В	П	В	П	В	П	В	П
<b>1 Риски внешней природы</b>										
P1	1.1	Экстремальные погодные условия: - срыв плановых сроков строительства и ввода в эксплуатацию; - проблемы обеспечения при неблагоприятных погодных условиях	2	3	3	3	3	2	3	3
P2	1.1	Риск обледенения	3	4	2	4	-	-	-	-
P3	1.1	Качка в период бурения при волнении	-	-	-	-	2	4	-	-
P4	1.1	Наличие сероводорода на больших глубинах увеличивающего коррозию металлических конструкций	2	3	2	3	2	3	2	3
P5	1.1	Наличие придонного течения, способствующего размыву	3	2	2	2	2	3	2	3
P6	1.2	Сейсмичность и опасные геологические процессы	3	4	2	4	2	4	2	4
P7	1.2	Риск выброса прорывного газа (метана) с последующим его воспламенением	2	4	2	4	2	4	2	4
P8	1.2	Наличие прогнозируемых пластов с аномально высокими давлением	2	3	2	4	2	3	2	4
P9	1.2	Риск нанесения существенного вреда природоохранным и рекреационным зонам, расположенным на побережье	3	4	2	4	2	4	2	4
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
P72		<b>В РЕЕСТР РИСКА ВОШЛИ 72 ВЫЯВЛЕННЫХ РИСКА</b>								
<b>ИТОГО</b>		<b>ИНДЕКС РИСКА</b>	<b>377</b>		<b>325</b>		<b>429</b>		<b>345</b>	

На основании выявленных рисков была выполнена качественная оценка риска и вычислен индекс риска для каждого варианта обустройства месторождения:

- индекс риска – интегральный показатель совокупного уровня рисков для каждого варианта;

- индекс риска включает в себя все риски данного варианта с учетом их величины (оценки вероятности и последствий реализации риска);
- индекс риска рассчитан на основе балльно-весовой методики, в которой веса каждой категории риска подобраны с учетом ожидаемых потерь от реализации рисков данной категории.

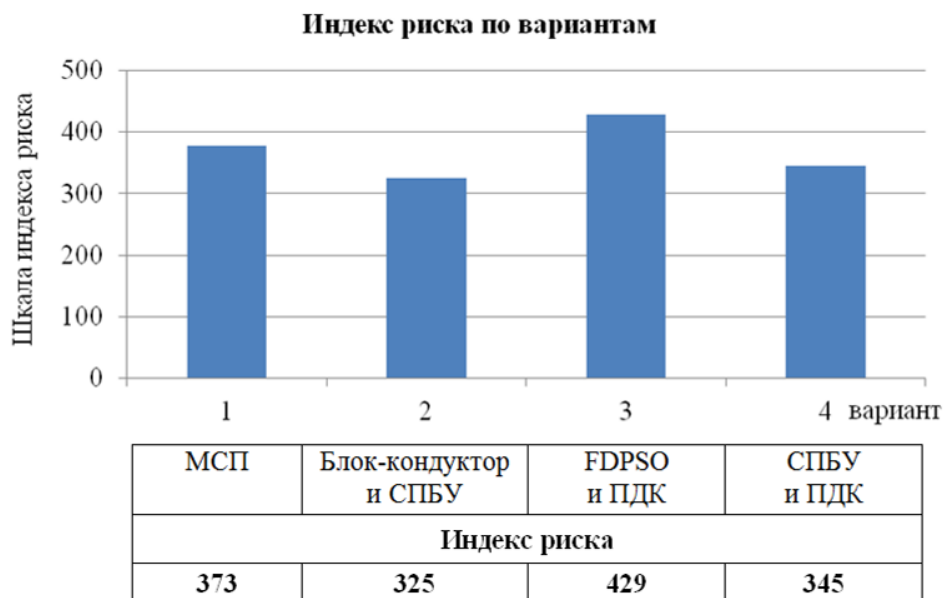


Рис. 1. Результаты качественной оценки риска по вариантам обустройства месторождения

Индексы риска представляют собой, по существу, качественный или полуколичественный подход к ранжированию и сопоставлению рисков.

**Технология оценки значимости риска. Матрица рисков**

Матрица рисков или матрица вероятности/последствий представляет собой способ отображения рисков в соответствии с их последствиями и вероятностью объединения этих характеристик для отображения рейтинга значимости риска.

Технологии оценки значимости риска используются в процессе, включающем определение снижения уровня риска. В работе рассмотрена модель Alagr, представляющая собой критерии, в которых критерий приемлемости или переносимости риска заключается в том, насколько целесообразно делать больше для снижения риска [17, 23, 30, 31].

Для осей матрицы рисков были определены индивидуальные шкалы вероятности и последствий (таблица 3, 4). После определения частотности и последствий каждой опасности и потенциально возможного аварийного случая эти показатели были использованы для определения относительных показателей степени риска. Показатели степени риска будут обозначать, какие опасности представляют наибольшие риски для рассматриваемой деятельности при обустройстве месторождения.

Результаты качественной оценки рисков визуализируются в матрице рисков и делятся по уровням, представленным в таблице 6. По вертикали располагается показатель вероятности, который описан в реестре риска, по горизонтали показатель

последствий. Показатель степени риска, располагающийся в месте пересечения двух показателей, будет входить в одну из следующих трех основных групп:

- Неприемлемый уровень (оранжевая заливка, показатели риска от 12 до 25) или недопустимая категория риска, где деятельность должна быть прекращена и подвергнута риску, чтобы снизить ее до приемлемого уровня. Для этого уровня риска на последующей стадии проектирования должен быть проведен детальный анализ неприемлемых опасностей с обязательной выработкой и внедрением особых мер безопасности для снижения риска.

- Приемлемый уровень (зеленая заливка, показатели риска до 3 включительно) или широко приемлемая категория риска, где риск настолько низок, что не нужно учитывать дальнейшее снижение риска. Приемлемый уровень риска, предусматривает контроль и подтверждение на последующих стадиях проектирования.

- Регион между этими пределами или практически разумный уровень – уровень Alarp (желтая заливка, показатель риска от 4 до 10 включительно), где дальнейшее снижение риска должно быть реализовано, если это разумно и практически осуществимо. Практически разумными считаются опасности, реализация которых с катастрофическими последствиями крайне маловероятна, либо частые события могут привести к малозначительным последствиям. В отношении таких опасностей не требуется осуществлять выработку и внедрение каких-либо мер на последующих стадиях проектирования, как и для приемлемого уровня риска [17].

Таблица 6

**Матрица рисков**

Последствия →		П1	П2	П3	П4	П5
Вероятность ↓		Заметные	Существенные	Умеренные	Критические	Катастрофические
B5	Очень часто	5 уровень Alarp	10 уровень Alarp	15 уровень	20 уровень	25 уровень
B4	Часто	4 уровень Alarp	8 уровень Alarp	12 уровень	16 уровень	20 уровень
B3	Возможно	3 уровень	6 уровень Alarp	9 уровень Alarp	12 уровень	15 уровень
B2	Нечасто	2 уровень	4 уровень Alarp	6 уровень Alarp	8 уровень Alarp	10 уровень Alarp
B1	Редко	1 уровень	2 уровень	3 уровень	4 уровень Alarp	5 уровень Alarp

Целью оценок риска является фокусированное внимание на областях наиболее высоких рисков, а также определение факторов, оказывающих на них значимое влияние. В матрице рисков преобладают риски, реализация которых с катастрофическими последствиями крайне маловероятна. Данная матрица позволяет оценить уровень каждого риска в отдельности и сфокусировать внимание на катастрофических и критических показателях.

В работе выполнена качественная оценка риска, так как количественная оценка, в том числе с точки зрения выработки мероприятий смягчения и устранения последствий сценарных событий, проводится на последующих этапах реализации

проекта – стадии разработки проектной документации в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 16 февраля 2008 г. № 87 «О составе разделов проектной документации и требования к их содержанию» при разработке «Декларации промышленной безопасности опасного производственного объекта» [9].

### **Заключение**

В результате выполненного анализа определена значимость каждого из критериев в зависимости от типа сооружения, глубины моря и внешних нагрузок окружающей среды в месте установки сооружения.

Применение методики оценки риска, так же, как и применение метода экспертных оценок и метода анализа иерархий позволяют выполнить первичную оценку о возможности реализации проектируемого сооружения в рассматриваемых условиях. Однако для получения более точного результата необходимо выполнение множества приближений, что усложняет процесс вычислений. Множество приближений обосновывается необходимостью уточнения каждого критерия с учетом конструктивного типа сооружения и условий эксплуатации. Для выбора критериев, позволяющих оценить и сравнить типы, рассматриваемых сооружений исходя из мировой практики, наличия опыта отечественного проектирования и строительства буровых платформ для добычи нефти и газа, буровые сооружения были классифицированы по конструктивному типу, по способу их установки над скважиной в процессе бурения, выделяя их в две основные группы.

Любая система оценки на стадии концептуального проекта или во время предпроектной проработки позволяет повысить лишь вероятность принятия правильного решения в случае отсутствия мирового аналога и недостатка объема исходных данных. Основная трудность при оценке риска в любой деятельности состоит в том, что неопределенность будущих результатов полностью неустранима, т.е. речь идет о влиянии факторов, которые либо неизвестны на момент принятия решения, либо влияние которых невозможно определить однозначно.

Авторами статьи разработана модель качественной оценки рисков; сформирована матрицы рисков и ранжирования вариантов обустройства на основании совокупного уровня риска. Сформирован объединенный реестр рисков, разработана методика и проведен расчет индекса риска с целью их ранжирования и сопоставления между собой для каждого варианта обустройства морского месторождения на стадии концептуального проектирования.

Анализ показал, что наиболее перспективный вариант обустройства месторождения, имеющий наименьший индекс риска в общем реестре риска может иметь критическое значение по одному из критериев; в данном случае такие риски есть в экологических аспектах. Следовательно, эти риски должны быть дополнительно рассмотрены экспертами и приняты меры, например, конструктивные решения, для снижения последствий или уменьшения вероятности их возникновения.

### **Список литературы**

1. Государственная программа Российской Федерации «Развитие судостроения и техники для освоения шельфовых месторождений на 2013-2030 годы». Утверждена постановлением Правительства РФ от 15.04.2014 № 304.
2. Мукаев Р.Ч. Оценка рисков инвестиционных проектов разработки нефтяных месторождений методом имитационного моделирования (Монте-Карло) // Проблемы анализа риска. Т. 12. 2015. № 3. С. 22-35.

3. Мазурина Е.В., Разманов С.В. Учёт рисков и неопределённости в инвестиционном проектировании нефтегазового бизнеса // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2006. № 6. С. 4-13.
4. Р 50.1.084–2012 Рекомендации по стандартизации. Менеджмент риска. Реестр риска. Руководство по созданию реестра риска организации.
5. Кулешова Е.В. Управление рисками проектов: учебное пособие. 2-е изд. Томск: Эль Контент, 2015. 188 с.
6. ГОСТ Р 51901.22-2012 Национальный стандарт Российской Федерации Менеджмент риска. Реестр риска. Правила построения.
7. Иванова О.А., Благовидова И.Л., Родькина А.В. Система критериев для сопоставления и оценки применимости различных типов буровых установок в суровых климатических условиях // Научные проблемы водного транспорта. 2020. № 65. С. 37–53.
8. Ставровский Е.Р., Лазарев Е.И. Совершенствование методов вероятностной оценки экономической эффективности и рисков инвестиционных проектов в газовой отрасли // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2011. № 4. С. 32-41.
9. Федеральный закон от 21.07.1997 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».
10. Анохин А.Н. Методы экспертных оценок. Учебное пособие. Обнинск, 1996, 148 с.
11. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ. Санкт-Петербург, Российский морской регистр судоходства, 2018, 460 с.
12. Гохман О.Г. Экспертное оценивание. Учебное пособие. Изд-во ВГУ, 1991.
13. ГОСТ Р 51901.21-2012 Национальный стандарт Российской Федерации. Менеджмент риска. Реестр риска. Общие положения.
14. Guidelines for formal safety assessment for use in the IMO rule-making process. MSC. MEPC.2/Circ. 12/Rev.2. London, International Maritime Organization, April 2018. 71 p.
15. Recommended practice DNVGL-RP-B401. DNV GL AS, June 2017. 64 p.
16. NACE Standard SP0387-2006 (formerly RP0387-99) Item No. 21036. NACE International, 2006. 9 p.
17. ГОСТ Р 58771-2019 Менеджмент риска. Технологии оценки риска.
18. Modelling and analysis of marine operations. Det Norske Veritas, 2011. 17 p.
19. Joachim Berger. IMPac Offshore Engineering, Hamburg. Ise protection structures. «Schiff und Hafen», June 2008. № 6.
20. Parshall J. Evolving Subsea Technology Tackles Huge New Risks of Today,s Projects. Journal of Petroleum Technology, May 2008. pp. 40–47.
21. Paul Verlaan, Ken Croasdale. ICE ISSUES RELATING TO THE KASHAGAN PHASE II DEVELOPMENT, NORTH CASPIAN SEA. POAC 01, August 2001. Ottawa, Canada.
22. InnoRig 21C-The super safe jack-up of the future // Offshore Technology International. 2012. URL: <http://www.offshore-publication.com> (дата обращения 18.03.2021).
23. 6 October 2016 – Deutsche Oel & Gas – Drilling of natural gas well KLU A-2 off to a successful start. URL: <http://www.deutsche-oel-gas.com>. (дата обращения 18.03.2021).
24. 30 September 2015 – Deutsche Oel & Gas – Completion of infrastructure – Summary of work in the Kitchen Lights Unit in 2015. URL: <http://www.deutsche-oel-gas.com>. (дата обращения 18.03.2021).
25. Kirwan B. A validation of three Human Reliability Quantification techniques – THERP, HEART and JHEDI: Part III - Results and validation exercise // Applied Ergonomics. 1997. 28(1). pp. 27-39.
26. Kirwan B. A Guide to Practical Human Reliability Assessment // London: Taylor & Francis. 1994.
27. Kirwan B., Ainsworth L.K. A Guide to Task Analysis // London: Taylor & Francis. 1992.
28. Kirwan B., Kennedy R., Taylor-Adams S., Lambert B. A validation of three Human Reliability Quantification techniques – THERP, HEART and JHEDI: Part II - Practical aspects of the usage of the techniques // Applied Ergonomics. 1997. 28(1). pp. 17-25.
29. Lees F. Human factors and human element // Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control. 1996. Vol. 3. Butterworth Heinemann.

30. Kobyliński L. System and risk approach to ship safety, with special emphasis on stability // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2007. 7. 4.
31. Kobyliński L., Staszewska K. Ocena ryzyka stateczności statku nieuszkodzonego // Ocena ryzyka przy zagrożeniu spowodowanym czynnikiem ludzkim. Fundacja Bezpieczeństwa Żeglugi, Raport 10. 2007.
32. Нефтяные слезы России: Экономика: РБК. URL: <https://www.rbc.ru/economics/10/04/2012/5703f5c09a7947ac81a66c05> (дата обращения 20.04.2021).
33. Последствия аварий на подводных переходах нефтяных магистралей и методы борьбы с ними. 2015. URL: <https://1cert.ru/stati/posledstviya-avariy-na-podvodnykh-perekhodakh-neftyanykh-magistralej-i-metody-borby-s-nimi> (дата обращения 23.04.2021).

#### References

1. Gosudarstvennaya programma Rossiyskoy Federatsii «Razvitiye sudostroyeniya i tekhniki dlya osvoyeniya shel'fovyykh mestorozhdeniy na 2013-2030 gody». [State program of the Russian Federation "Development of shipbuilding and equipment for the development of offshore fields for 2013-2030".] Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation of April 15, 2014 No. 304
2. Mukaev R.Ch. Otsenka riskov investitsionnykh proyektov razrabotki neftyanykh mestorozhdeniy metodom imitatsionnogo modelirovaniya (Monte-Karlo) [Risk assessment of investment projects for the development of oil fields by simulation modeling (Monte Carlo)] *Problems of risk analysis*. T. 12. 2015. No. 3. pp. 22-35.
3. Mazurina E.V., Razmanov S.V. Uchet riskov i neopredelonnosti v investitsionnom proyektirovaniy neftegazovogo biznesa [Accounting for risks and uncertainty in the investment design of the oil and gas business] *Problemy ekonomiki i upravleniya neftegazovym kompleksom*. 2006. № 6. pp. 4-13.
4. R 50.1.084–2012 Rekomendatsii po standartizatsii. Menedzhment riska. Reyestr riska. Rukovodstvo po sozdaniyu reyestra riska organizatsii. [Recommendations for standardization. Risk management. Risk register. Guidance for creating an organization's risk register.]
5. Kuleshova Ye.V. Upravleniye riskami proyektov: uchebnoye posobiye. [Project risk management: a tutorial] 2-ye izd. Tomsk: El' Kontent, 2015. 188 p.
6. GOST R 51901.22-2012 Natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii Menedzhment riska. Reyestr riska. Pravila postroyeniya. [National standard of the Russian Federation Risk management. Risk register. Construction rules.]
7. Ivanova O.A., Blagovidova I.L., Rodkina A.V. Sistema kriteriyev dlya sopostavleniya i otsenki primenimosti razlichnykh tipov burovykh ustanovok v surovyykh klimaticheskikh usloviyakh [A system of criteria for comparing and evaluating the applicability of various types of drilling rigs in harsh climatic conditions] *Nauchnyye problemy vodnogo transporta*. 2020. № 65. pp. 37–53.
8. Stavrovskiy Ye.R., Lazarev Ye.I. Sovershenstvovaniye metodov veroyatnostnoy otsenki ekonomicheskoy effektivnosti i riskov investitsionnykh proyektov v gazovoy otrasli [Improving the methods of probabilistic assessment of economic efficiency and risks of investment projects in the gas industry] *Problemy ekonomiki i upravleniya neftegazovym kompleksom*. 2011. № 4. S. 32-41.
9. Federal'nyy zakon ot 21.07.1997 g. № 116-FZ «O promyshlennoy bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob"yektov». [On Industrial Safety of Hazardous Production Facilities]
10. Anokhin A.N. Metody ekspertnykh otsenok. Uchebnoye posobiye. [Methods of expert assessments. Tutorial] Obninsk, 1996, 148 p.
11. Pravila klassifikatsii, postroyki i oborudovaniya plavuchikh burovykh ustanovok i morskikh statsionarnykh platform [Rules for the Classification, Construction and Equipment of Floating Drilling Units and Offshore Fixed Platforms] Saint-Petersburg: Russian Maritime Register of Shipping, 2018. 460 p.
12. Gokhman O.G. Ekspertnoye otsenivaniye. Uchebnoye posobiye. [Expert assessment. Tutorial] Izd-vo VGU, 1991.

13. GOST R 51901.21-2012 Natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii. Menedzhment riska. Reyestr riska. Obshchiye polozheniya. [National Standard of the Russian Federation. Risk management. Risk register. General provisions.]
14. Guidelines for formal safety assessment for use in the IMO rule-making process. MSC. MEPC.2/Circ. 12/Rev.2. London, International Maritime Organization, April 2018. 71 p.
15. Recommended practice DNVGL-RP-B401. DNV GL AS, June 2017. 64 p.
16. NACE Standard SP0387-2006 (formerly RP0387-99) Item No. 21036. NACE International, 2006. 9 p.
17. GOST R 58771-2019 Menedzhment riska. Tekhnologii otsenki riska. [Risk management. Risk assessment technologies.]
18. Modelling and analysis of marine operations. Det Norske Veritas, 2011. 17 p.
19. Joachim Berger. IMPac Offshore Engineering, Hamburg. Ice protection structures. «Schiff und Hafen», June 2008. № 6.
20. Parshall J. Evolving Subsea Technology Tackles Huge New Risks of Today's Projects. Journal of Petroleum Technology, May 2008. pp. 40–47.
21. Paul Verlaan, Ken Croasdale. ICE ISSUES RELATING TO THE KASHAGAN PHASE II DEVELOPMENT, NORTH CASPIAN SEA. POAC 01, August 2001. Ottawa, Canada.
22. InnoRig 21C-The super safe jack-up of the future // Offshore Technology International. 2012. URL: <http://www.offshore-publication.com> (accessed 18.03.2021).
23. 6 October 2016 – Deutsche Oel & Gas – Drilling of natural gas well KLU A-2 off to a successful start. URL: <http://www.deutsche-oel-gas.com>. (accessed 18.03.2021).
24. 30 September 2015 – Deutsche Oel & Gas – Completion of infrastructure – Summary of work in the Kitchen Lights Unit in 2015. URL: <http://www.deutsche-oel-gas.com>. (accessed 18.03.2021).
25. Kirwan B. A validation of three Human Reliability Quantification techniques – THERP, HEART and JHEDI: Part III - Results and validation exercise // Applied Ergonomics. 1997. 28(1). pp. 27-39.
26. Kirwan B. A Guide to Practical Human Reliability Assessment // London: Taylor & Francis. 1994.
27. Kirwan B., Ainsworth L.K. A Guide to Task Analysis // London: Taylor & Francis. 1992.
28. Kirwan B., Kennedy R., Taylor-Adams S., Lambert B. A validation of three Human Reliability Quantification techniques – THERP, HEART and JHEDI: Part II - Practical aspects of the usage of the techniques // Applied Ergonomics. 1997. 28(1). pp. 17-25.
29. Lees F. Human factors and human element // Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control. 1996. Vol. 3. Butterworth Heinemann.
30. Kobyliński L. System and risk approach to ship safety, with special emphasis on stability // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2007. 7. 4.
31. Kobyliński L., Staszewska K. Ocena ryzyka stateczności statku nieuszkodzonego // Ocena ryzyka przy zagrożeniu spowodowanym czynnikiem ludzkim. Fundacja Bezpieczeństwa Żeglugi, Raport 10. 2007.
32. Neftyanyye slezy Rossii: Ekonomika: RBK. [Oil tears of Russia: Economics: RBC.] URL: <https://www.rbc.ru/economics/10/04/2012/5703f5c09a7947ac81a66c05> (accessed 20.04.2021).
33. Posledstviya avariya na podvodnykh perekhodakh neftyanykh magistralei i metody bor'by s nimi [Consequences of accidents at underwater crossings of oil pipelines and methods of dealing with them] 2015. URL: <https://1cert.ru/stati/posledstviya-avariya-na-podvodnykh-perekhodakh-neftyanykh-magistralei-i-metody-borby-s-nimi> (accessed 23.04.2021).

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

**Иванова Ольга Александровна**,  
канд. техн. наук, инженер-конструктор  
1-й категории АО «ЦКБ «Коралл», 299028,  
г. Севастополь, ул. Репина, 1;  
доцент кафедры «Океанотехника и  
кораблестроение» ФГАОУ ВО

**Olga A. Ivanova**, Ph.D. in Engineering Science,  
Design Engineer of 1st Category of General  
Engineering and Naval Architecture  
Department 11, General Engineering Office  
111 "Corall" JSC Central Design Bureau, 1,  
Repina st., Sevastopol; 299028;



«Севастопольский государственный университет», 299053, г. Севастополь,  
ул. Университетская, 33,  
e-mail: o.a.ivanova.kmt@mail.ru

Assistant Professor of the Department of Ocean Technology and Shipbuilding Sevastopol State University, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053

**Родкина 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

**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

Статья поступила в редакцию 15.04.2022; опубликована онлайн 07.06.2022.  
Received 15.04.2022; published online 07.06.2022.

УДК 629.12

DOI: 10.37890/jwt.vi71.252

## **Проблемы совершенствования подходов к конструктивной противопожарной защите судов из композиционных материалов**

**А.Г. Назаров**

*ORCID: 0000-0002-6313-6277*

*Albatross Marine Design, Таиланд/АН Марин Консалтинг, Россия*

**Аннотация.** Применение композиционных материалов в судостроении открывает новые возможности в создании энергоэффективных судов и судов новых типов. Однако возникает проблема горючести этих материалов, которая ограничивает их внедрение в практику постройки конвенционных и других судов, связанная с вопросами конструктивной противопожарной защиты. В статье рассмотрено регулирование применения композитных корпусов в зарубежной и российской практике, отмечены их различия, даны рекомендации по совершенствованию российских подходов с учетом потребностей импортозамещения.

**Ключевые слова:** композиционные материалы, конструктивная противопожарная защита, нормирование.

## **Problems of improvement of approaches to structural fire protection of ships in composite materials**

**Albert G. Nazarov**

*ORCID: 0000-0002-6313-6277*

*Albatross Marine Design, Thailand/AN Marine Consulting, Russia*

**Abstract.** The use of composite materials in shipbuilding opens up new opportunities in the creation of energy-efficient vessels and new types of vessels. However, the problem of the combustibility of these materials arises, which limits their introduction into the practice of conventional and other vessels building, related to the issues of structural fire protection. The article considers the regulation of composite hulls use in foreign and Russian practice, their differences are noted, recommendations are given for improving Russian approaches, taking into account the needs of import substitution.

**Keywords:** composite materials, structural fire protection, regulation.

Применение композитных материалов (КМ) - одно из перспективных направлений развития современного судостроения. Эти материалы состоят из армирующих (ткани, волокна) и связующих (смолы) элементов, а также применяются в виде трехслойных конструкций со средним слоем из легкого наполнителя. Особенностью указанных конструкций является возможность проектирования материала под действующие нагрузки и условия эксплуатации. Кроме того, сам материал образуется непосредственно в процессе постройки судна, и его свойства напрямую зависят от особенностей технологии. Все это требует переосмысления подходов и соответствующей квалификации проектировщиков и судостроителей, что в результате позволяет создавать легкие конструкции с уникальными прочностными свойствами.

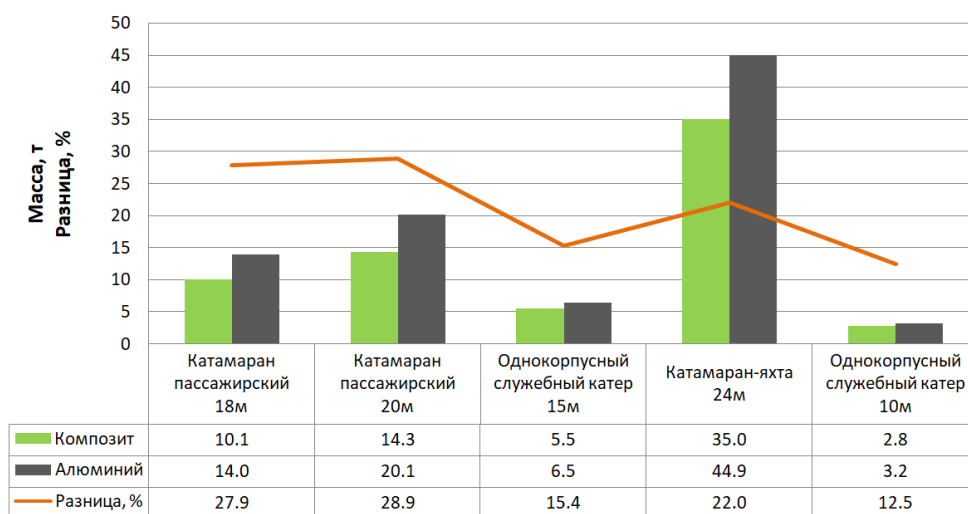


Рис. 1. Сравнение массы корпуса судов из КМ и алюминиевых сплавов - проекты КБ Albatross Marine Design (AMD)

На рис.1 представлен анализ массы конструкций скоростных судов из КМ на основе стекломатериалов в сравнении с аналогичными судами из алюминиевых сплавов, без учета изоляции. Налицо существенное снижение массы для корпусов из КМ, особенно для судов катамаранного типа. При использовании углеродных волокон экономия массы будет еще более значительной. Указанная экономия массы позволяет существенно повысить энергоэффективность судна (особенно высокоскоростного), а для судов с электродвижением - существенно повысить дальность плавания.

Если говорить о технологичности серийной постройки судов и их стоимости, то возможности КМ позволяют в короткие сроки обеспечить рынок РФ судами для внутреннего туризма и пассажирских перевозок, что выгодно отличает их от судов из металла.

С другой стороны, большинство нормативных документов и методов проектирования судов созданы в первую очередь для металлического судостроения, и не всегда позволяют должным образом использовать преимущества КМ. При разработке проектов судов из КМ для рынка РФ возникают ограничения, связанные с требованиями негорючести материала корпуса. Эта проблема наиболее выражена при работе с Российским морским регистром судоходства (РМРС), который имплементирует все международные нормативные документы ИМО и МАКО в свою деятельность. Российский речной регистр (РРР) имеет более гибкие требования к негорючести материала корпуса, но и для него характерны ограничения для судов высших категорий. Таким образом, совершенствование нормативных документов является необходимым условием развития компетенций судостроения из КМ.

В статье поставлена задача выполнить анализ существующих подходов к конструкциям из КМ и предложены пути совершенствования нормативной базы, опираясь на международный опыт работы КБ AMD с проектами таких судов (рис.2).

#### Композит vs сталь: особенности подходов

На заре металлического судостроения бытовало мнение, что «сталь непригодна для постройки судов, т.к. сталь тонет», в отличие от дерева. На самом деле, суда из

дерева также тонут, поскольку они несут значительное количество балласта, груза, запасов и оборудования.

Сегодня подобная ситуация происходит с КМ: часто можно услышать утверждение, что «КМ не подходит для постройки судов, потому что он горит». Эти утверждения обычно сопровождаются демонстрацией фото горящих судов из КМ, например пожара на судах в постройке: тримаране «Klewang» в 2012 или «Сообразительный» в 2021 - в обоих случаях на судах не была смонтирована система обнаружения и тушения пожаров. На самом деле, суда из стали также горят, поскольку горючими являются применяемые краски, отделочные материалы, оборудование, груз и топливо. Применимость материала необходимо оценивать комплексно, исходя из горючести материала, его теплопроводности, сохранения прочности и стратегии тушения пожара, а также токсичности при горении.



Рис. 2. Пассажирские суда из КМ (проекты AMD) а) катамаран пр. ASV1500 на 54 пассажира; б) катамаран пр. Н48 на 36 пассажиров; в) катамаран пр. АТ1500 на 115 пассажиров; г) однокорпусное судно пр. SB60V на 40 пассажиров

Сталь представляет собой негорючий материал по определениям IMO FTP Code [1], но покрытия и отделка стальной конструкции чаще всего являются горючими. Сталь обладает высокой теплопроводностью, и локализация пожара на стальном судне достигается путем создания противопожарных зон при проектировании и охлаждением конструкций при тушении. При этом пожар может распространяться через неповрежденные конструкции за счет их теплопроводности. Для локализации и тушения пожара на стальном судне необходимо привлечение большого количества персонала, подвергаемого риску. Стальные конструкции сохраняют прочность при нагреве при условии, что их эффективно охлаждают.

КМ представляют из себя горючий материал, но могут иметь защитное покрытие/изоляцию из огнестойкого или негорючего материала. КМ может способствовать развитию пожара, если уровень этой защиты превышен. С другой стороны, теплопроводность материалов низкая, локализация пожара может быть достигнута без охлаждения конструкций корпуса. Для тушения такого пожара

требуется меньшее количество персонала, а тушение сводится к охлаждению непосредственно зоны пожара. Конструкция из КМ в общем случае быстро теряет прочность при высоких температурах, но это может быть не очень существенным фактором с учетом низкой теплопроводности КМ.

Еще одной особенностью существующих судов из КМ является, как правило, их небольшой размер и ограниченная пассажировместимость. Для них характерна малая продолжительность рейсов, размещение пассажиров в салоне, а не в каютах, район эксплуатации таких судов ограничен внутренними либо прибрежными акваториями. Время эвакуации людей с таких судов мало, а возможность оказания сторонней помощи таким судам высокая.

Таким образом, если говорить об эквивалентной безопасности стальных и композитных конструкций в части конструктивной противопожарной защиты (КПЗ), ответ не столь однозначен [2]. В этой части, видимо, требуется принципиально иной подход к обеспечению КПЗ, не ориентированный - как сейчас - преимущественно на стальные конструкции.

### **Общие подходы к КПЗ судов из КМ**

В международной практике судостроения КМ широко применяется, особенно для постройки малых судов, т.е. длиной до 24м. Однако проблема оценки горючести КМ в судостроении является существенным сдерживающим фактором. Исходя из характера требований к КПЗ, области применения КМ в настоящее время можно разделить на следующие группы:

- Область широкого применения – рекреационные суда длиной до 24м (в настоящее время, около 80% таких судов строятся из КМ), а также спасательные шлюпки.
- Область проверенных технологий – промысловые и служебные суда, пассажирские суда местного сообщения, яхты длиной более 24м. Несмотря на значительное развитие в мире, эта группа слабо представлена в РФ.
- Область перспективных технологий – суда в основном более 24м, попадающие под международные конвенции, а также элементы конструкций и оборудования конвенционных судов. В этой группе должны применяться альтернативные решения, позволяющие удовлетворить требования SOLAS к противопожарной защите. В настоящее время, несколькими консорциумами в Европе ведутся опытно-конструкторские разработки в этом направлении; здесь можно отметить проекты LASS, RAMSES, FIBRESHIP и др.

Следует признать, что основным сдерживающим фактором применения КМ является конвенция SOLAS [3] в части выполнения требований из кодекса процедур испытаний огнем IMO FTP [1]. Эти документы предписывают применение для изготовления корпуса судна «стали или эквивалентного материала». Без преувеличения можно сказать, что указанные документы хотя и допускают применение «альтернативных решений», но, тем не менее, разработаны с явным уклоном в сторону стального судостроения.

Важно четко понимать, что конвенция SOLAS (за исключением глав, связанных с обеспечением навигации) формально распространяется лишь на суда, совершающие международные рейсы, а также исключает некоторые типы судов, например яхты, рыболовные и военные (см.табл.1). Это позволяет морской администрации флага самостоятельно определять требования к материалу корпуса судов и допускать применение КМ для «неконвенционных» судов, включая пассажирские суда местного

сообщения (рис.2). Подобные суда широко используются для местных перевозок, без предъявления требований к негорючести материала корпуса. Заметим, что статистикой не подтверждается повышенная пожароопасность таких судов по сравнению с судами из других материалов. Поскольку размеры таких судов, как правило, невелики и время эвакуации с них мало, завышенные требования к негорючести корпуса не оправданы.

Таблица 1

**Применимость КМ к различным группам судов по SOLAS [3]**

Тип судов по отношению к SOLAS	Применимость КМ
Суда, не совершающие международных рейсов	Высокая
Суда, исключенные из SOLAS: военные, яхты, несамоходные, деревянные примитивной постройки, «грузовые» до 500РТ, рыболовные.	Высокая
Суда, не полностью попадающие под SOLAS: любое судно с «инновационными характеристиками», по решению администрации флага, при обеспечении «эквивалентной безопасности»	Средняя
Суда, полностью попадающие под SOLAS: пассажирские и «грузовые» более 500РТ.	Низкая

Примечание: цвет соответствует «дружелюбности» к КМ

Таблица 2

**Применимость КМ в судостроении - зарубежный опыт**

Тип судна	До 24м (до 35м)	Более 24м
Рекреационные	ISO9094 предполагается что КПЗ обеспечена материалом корпуса из КМ	Согласно REG LY Code [13], в зависимости от тоннажа/района плавания
Служебные, патрульные, грузовые до 500 РТ, рыболовные	DNV0342; MCA MGN280 – в зависимости от объема МО и мощности двигателя изоляция B15 или тест на прожигание	Иностранные КО, NSCV - изоляция МО на A0/A60, или эквивалент
Пассажирские местного сообщения	SCV Code, NSCV – изоляция МО на A0/A60, или тест на прожигание переборки	NSCV - изоляция МО на A0/A60, или SOLAS в зависимости от категории, вместимости
Пассажирские – международные рейсы	SCV Code, NSCV - изоляция МО на A0/A60, или тест на прожигание, или SOLAS	Соответствие SOLAS – Корпус из стали или эквивалентного материала

Примечание: цвет соответствует «дружелюбности» к КМ

К сожалению, в российской практике обсуждаемые требования SOLAS традиционно применяются РМРС [4,5] для всех пассажирских судов, не совершающих международные рейсы, а также для грузовых судов вместимостью менее 500РТ. Это существенно усложняет применение КМ в судостроении, а де-факто

– запрещает такое применение. Результат - практически полное отсутствие коммерческого судостроения из КМ в РФ, и вследствие этого потеря компетенций в композитной отрасли.

### **Зарубежные подходы к обеспечению КПЗ судов**

Для рекреационных судов длиной менее 24м применяется стандарт ISO9094 [6], который охватывает требования к установке систем пожаротушения, огнетушителей, камбузных плит, топливных танков и аварийных выходов. Стандарт не определяет требования в КПЗ, т.к. считается, что она в должной степени обеспечивается материалом корпуса малого судна, в том числе из КМ.

Подобный же подход применялся к прогулочным и рабочим судам в правилах GL для судов длиной до 24м [7]. Для судов с мощностью главных двигателей более 400кВт, предписывалось в машинном отделении использовать зашивку из негорючего материала по строительному/транспортному стандарту DIN4102 или B15 по SOLAS.

Для служебных и рабочих судов по DNV0342 [8] предполагается применение изоляции машинных отделений выше ватерлинии, с классом огнестойкости не менее 15 минут. Для судов длиной до 15м могут применяться другие методы, в частности, самозатухающие смолы, вспучивающиеся краски т.д.

Британские требования MCA MGN280 [9] применяемые для судов до 24м оговаривают КПЗ переборок машинных отделений лишь для судов с более чем 16 человеками на борту, либо судов высших категорий с мощностью главных двигателей более 750кВт. При этом, требуется огнестойкость в течение 15 минут при выполнении теста на прожигание переборки горелкой. Обычно это требование выполняется за счет армирования переборки ровингами на смолах с присадками, либо за счет покрытий.

SCV Code [10] разработан при участии ИМО для стран Карибского бассейна и покрывает коммерческие суда длиной до 24м и пассажировместимостью до 150 человек. В документе для судов из КМ предусматривается обеспечение КПЗ машинных отделений на огнестойкость и дымонепроницаемость. Для определения огнестойкости переборок применяется тест на прожигание горелкой в течение 15 минут; обеспечение огнестойкости – за счет армирования ровингом на смолах с присадками, либо за счет покрытий. Дополнительно, введено требование изоляции класса A15 для мест посадки на спасательные плоты, если таковые примыкают к машинным отделениям либо камбузам.

Австралийский стандарт NSCV [11] предлагает хорошо структурированную систему требований для коммерческих судов, не совершающих международных рейсов, и его подходы могут быть приняты за основу при разработке дифференцированных стандартов РФ.

Стандарт NSCV предполагает назначение «категории риска пожара» судна в зависимости от типа судна (пассажирское, грузовое, рыболовное), длины и пассажировместимости, а также района эксплуатации. Для судов прибрежных районов плавания, перевозящих не более 36 пассажиров, предусмотрена самая низкая категория опасности – I. В этом случае, например, для судов с мощностью двигателей до 120кВт не требуется дополнительная изоляция машинного отделения. Из опыта разработки автором проектов под NSCV, корпуса из КМ могут применяться для судов прибрежных категорий судов, перевозящих до 200 пассажиров без ограничения длины при условии изоляции помещений высокой опасности на класс A30, а перевозящих до 450 пассажиров – на класс A60.

Для групп судов высших районов плавания А и В длиной более 35м или более 450 пассажиров предусмотрена категория риска пожара IV и требуется полное соответствие SOLAS в части КПЗ.

Отдельной группой являются спасательные шлюпки, требования к которым унифицированы в составе IMO LSA Code [12] и применение КМ связано с реалистичными требованиями к огнестойкости (не путать с негорючестью) материала корпуса, обеспечиваемого антипиренами, содержащимися в связующих материалах.

Таким образом, ни один из перечисленных выше нормативных документов не требует применения для корпуса «стали или эквивалентного материала», что позволяет применять КМ для постройки подобных судов.

### **Российские требования к КПЗ для судов из КМ**

В отличие от зарубежных правил и стандартов, правила РМРС [3,4] требуют применения «стали или эквивалентного материала» для всех без исключения судов, судов кроме рыболовных, спасательных шлюпок, а также низших категорий прогулочных судов (табл.3). Фактически, к судам, не попадающим под конвенции применяются конвенционные требования SOLAS, что делает невозможным применение КМ для постройки корпуса. Известны случаи, когда РМРС предъявлял требования «защитить корпус судна стальными листами» для обеспечения изоляции класса А0. Подобная зашивка абсурдна с точки зрения противопожарной защиты (невозможно охлаждение с обратной стороны), не говоря уже о неоправданном росте массы конструкции. Как результат многолетней проблемы с нормированием, суда из КМ с классом РМРС практически не строятся.

Для Российского Речного Регистра [14] аналогично ситуация выглядит при классификации пассажирских судов с классами О-ПР, М-ПР и М-СП; для судов более низких категорий требования конструктивной противопожарной защиты выполнимы для КМ. Фактические требования негорючести материала корпуса содержатся в техническом регламенте [15] путем ссылок на конвенцию SOLAS, в то время как техрегламенте для судов внутреннего плавания [16] таких ссылок нет.



Таблица 3

**Применимость КМ в судостроении - российский опыт (РМРС)**

Тип судна	До (20) 24м	Более (20) 24м
Рекреационные (прогулочные)	Корпус из негорючего материала для судов высших категорий (А, А1, А2, В)	Требования отсутствуют
Рыболовные	В15-В30; огнестойкие материалы в жилых помещениях	Корпус из стали или эквивалентного материала
Служебные, патрульные, грузовые до 500	Корпус из стали или эквивалентного материала	Корпус из стали или эквивалентного материала
Пассажирские местного сообщения	Корпус из стали или эквивалентного материала	Корпус из стали или эквивалентного материала
Пассажирские – международные рейсы	Корпус из стали или эквивалентного материала	Корпус из стали или эквивалентного материала

Примечание: цвет соответствует «дружелюбности» к КМ

**Возможные конструктивные решения для обеспечения КПЗ**

На практике обеспечение огнестойкости и/или негорючести в судостроении может быть достигнуто несколькими способами. Сюда относятся покрытия, например трудногорючие самозатухающие смолы, краски и гелькоуты, вспучивающиеся покрытия и обмазки. Огнестойкие смолы в составе КМ могут обеспечить огнестойкость и отсутствие интенсивного дымообразования, но на сегодняшний день не могут обеспечить требуемую конвенциями негорючесть. В конструкциях, проходящих тест на прожигание переборки, часто используется усиленное армирование стеклоровингами как наиболее эффективное решение. Возможно также применение КМ с усиленным огнестойкими свойствами, например на основе фенольных смол, однако этот вид КМ малопригоден для судостроения, т.к. требует термоотверждения крупногабаритных конструкций. Для обеспечения изоляции на класс А0-А60 используется зашивка листовой изоляцией, например негорючими матами (которые на сегодняшний день недоступны из-за санкционных ограничений) или стальными листами. Как правило, на судах из КМ в мировой практике вышеперечисленные решения применяются выборочно и только к конструкциям помещений, считающихся опасными с точки зрения возникновения пожара. К сожалению, ни одно из перечисленных применимых решений пока не в состоянии удовлетворить требования FTP Code [1] и SOLAS [3] к негорючести материала корпуса, что, тем не менее, позволяет с успехом применять их для «неконвенционных» судов.



Рис. 3. Перспективный катамаран из КМ длиной 30м на 250 пассажиров с электродвижением – проект AMD

### **Заключение**

Согласно статистическим данным Ространснадзора, в 2020 году из 60 аварий на морских и внутренних водных путях РФ 4 связано с пожарами и взрывами. Таким образом, проблема защиты судов от пожаров существует, и она актуальна. Тем не менее, в морской отрасли РФ [4,14,15] регулирование конструкций из КМ в общем случае представляется неоправданно жестким в сравнении с другими видами транспорта и гражданским строительством.

Можно утверждать, что без выработки адекватных требований к КПЗ судов из КМ невозможно развитие компетенции композитного судостроения. Как минимум, для судов, не совершающих международных рейсов и имеющих ограниченную пассажировместимость, требования к КПЗ должны быть снижены до выполнимого уровня. Необходимо в полной мере использовать имеющуюся нишу «проверенных технологий» – производить суда из КМ местного сообщения (рис.3), а также служебные, рабочие и т.д. В дальнейшем, следуя тенденциям мирового судостроения, необходима работа в области перспективных технологий для внедрения КМ в конвенционное судостроение.

На основе выполненного автором анализа разработаны нормативные предложения по разработке требований в виде матрицы КПЗ для судов из КМ. В целом, подход аналогичен табл.2 и учитывает мировой опыт.

Применение теста на прожигание переборки горелкой является перспективным подходом для судов до 24м, т.к. может быть осуществлено верфью, строящей малые суда без приобретения специализированных изоляционных материалов с учетом минимальных партий и санкционных ограничений. Для более крупных судов рационально применять изоляцию в виде зашивки переборок машинного отделения и других помещений высокой опасности огнестойкими матами, без требования негорючести остального корпуса.

Развитие компетенций в области судов из КМ неразрывно связано с судами для внутреннего туризма и пассажирских перевозок как одним из элементов реализации

правительственных госпрограмм РФ по развитию туризма и транспортной инфраструктуры. С другой стороны, судостроение из КМ является этапом реализации государственной программы развития производства композиционных материалов и изделий из них. В этом контексте, задача совершенствования нормативной базы композитного судостроения становится важнейшей государственной задачей.

#### Список литературы

1. International Code for Application of Fire Test Procedures, 2010 (IMO 2010 FTP Code)
2. McGeorge D. Fire Safety of Naval Vessels made of Composite Materials: Fire Safety Philosophies, Ongoing Research and State-of-the-Art Passive Fire Protection// D. McGeorge, B.Høyning /Fire Safety and Survivability, Aalborg, Denmark, 23-26 September 2002, RTO-MP-103.
3. International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS) 1974/2015.
4. Правила классификации и постройки морских судов. Российский Морской Регистр Судоходства, 2022.
5. Правила классификации и постройки высокоскоростных судов. Российский Морской Регистр Судоходства, 2018.
6. ISO9094-2015. Small craft — Fire protection
7. Rules for Classification and Construction Yachts and Boats, Germanischer Lloyd, 2002
8. DNV-GL Standard 0342 – Craft, 2016.
9. Small Vessels in Commercial Use for Sport or Pleasure, Workboats and Pilot Boats – Alternative Construction Standards. MSN 280 – SCV Code - Maritime Coastguard Agency, UK.
10. Code of Safety for Small Commercial Vessels operating in the Caribbean 2021 (SCV-Code).
11. National Standard for Commercial Vessels, Stability – Australian Maritime Safety Authority, 2016.
12. International Code on Life-Saving Appliances (IMO LSA Code), 1996.
13. Red Ensign Group Yacht Code, 2019.
14. Правила классификации и постройки судов. Российский Речной Регистр, 2022.
15. Технический регламент о безопасности объектов морского транспорта (в редакции постановлений Правительства Российской Федерации от 04.09.2012 № 882, от 26.03.2014 № 230, от 29.07.2017 № 896, от 07.10.2019 № 1288).
16. Технический регламент о безопасности объектов внутреннего водного транспорта (в редакции постановлений Правительства Российской Федерации от 04.09.2012 № 882, от 30.04.2015 № 426, от 29.05.2018 № 613, от 06.08.2020 № 1183).

#### References

1. International Code for Application of Fire Test Procedures, 2010 (IMO 2010 FTP Code)
2. McGeorge D. Fire Safety of Naval Vessels made of Composite Materials: Fire Safety Philosophies, Ongoing Research and State-of-the-Art Passive Fire Protection// D. McGeorge, B.Høyning /Fire Safety and Survivability, Aalborg, Denmark, 23-26 September 2002, RTO-MP-103.
3. International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS) 1974/2015.
4. Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov. [Rules for classification and construction of seagoing vessels] Rossiiskii Morskoi Registr Sudokhodstva, 2022.
5. Pravila klassifikatsii i postroiki vysokoskorostnykh sudov. [Rules for classification and construction of high-speed vessels] Rossiiskii Morskoi Registr Sudokhodstva, 2018.
6. ISO9094-2015. Small craft — Fire protection
7. Rules for Classification and Construction Yachts and Boats, Germanischer Lloyd, 2002
8. DNV-GL Standard 0342 – Craft, 2016.
9. Small Vessels in Commercial Use for Sport or Pleasure, Workboats and Pilot Boats – Alternative Construction Standards. MSN 280 – SCV Code - Maritime Coastguard Agency, UK.
10. Code of Safety for Small Commercial Vessels operating in the Caribbean 2021 (SCV-Code).
11. National Standard for Commercial Vessels – Australian Maritime Safety Authority, 2016.

12. International Code on Life-Saving Appliances (IMO LSA Code), 1996.
13. Red Ensign Group Yacht Code, 2019.
14. Pravila klassifikacii i postrojki sudov. [Rules for classification and construction of vessels] Rossijskij Rečnoj Registr 2022.
15. Tekhnicheskij reglament o bezopasnosti obektov morskogo transporta [Technical regulation on safety of objects of marine transport]. V redakcii postanovlenij pravitelstva Rossijskoj Federacii ot 04 09 2012 882 ot 26 03 2014 230 ot 29 07 2017 896 ot 07 10 2019 1288.
16. Tekhnicheskij reglament o bezopasnosti obektov vnutrennego vodnogo transporta [Technical regulation on safety of objects of inland water transport]. V redakcii postanovlenij pravitelstva Rossijskoj Federacii ot 04 09 2012 882 ot 30 04 2015 426 ot 29 05 2018 613 ot 06 08 2020 1183.

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

**Назаров Альберт Георгиевич**, к.т.н., FRINA, CEng, MSNAME, директор, конструкторское бюро "Albatross Marine Design", Таиланд, «АН Марин Консалтинг», Россия, email: an@amdesign.co.th

**Albert G.Nazarov**, Cand Sci (Tech), FRINA, CEng, MSNAME, director, design bureau, «Albatross Marine Design», Thailand, «AN Marine Consulting», Russia, email: an@amdesign.co.th

Статья поступила в редакцию 17.04.2022; опубликована онлайн 07.06.2022.  
Received 17.04.2022; published online 07.06.2022.

## **ЭКСПЛУАТАЦИЯ СУДОВОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

### **OPERATION OF SHIP POWER EQUIPMENT**

УДК 621.4

DOI: 10.37890/jwt.vi71.263

#### **Котел-утилизатор в составе многоцелевого испытательного стенда на базе двигателя 2Ч 10.5/13**

**О.П. Шураев<sup>1</sup>**

**Д.И. Бевза<sup>1</sup>**

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

**Аннотация.** Рассматриваются вопросы разработки и создания многоцелевого стенда на базе двигателя 2Ч 10.5/13. Основными направлениями экспериментальных исследований на данном стенде названы: утилизация теплоты отработавших газов, способы снижения выбросов вредных веществ с отработавшими газами двигателей, оптимизация параметров систем двигателя, применение различных топлив в ДВС, включая водотопливные эмульсии и биотопливо, контроль рабочего процесса в цилиндре и измерение крутящего момента. Подчеркивается, что указанными направлениями не исчерпываются возможности стенда. Рассмотрены мероприятия по модернизации систем двигателя и стенда: воздухоподогревателя и газовойпускной, топливной и охлаждения. Показано, что для контроля параметров стенда необходим измерительный комплекс, позволяющий непрерывно измерять большое количество параметров, выполнять их обработку, отображение, архивацию и передачу на компьютер, управляющий работой стенда.

**Ключевые слова:** Испытания двигателей, котел-утилизатор, экспериментальные исследования, системы двигателя, теплотехнические измерения

#### **A heat recovery boiler as part of a multi-purpose research bench based on an engine 2CH 10.5/13**

**Oleg P. Shurayev<sup>1</sup>**

**Denis I. Bevza<sup>1</sup>**

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

**Abstract.** The issues of the development and creation of a multi-purpose stand based on the 2CH 10.5/13 engine are considered. The main areas of experimental research using this stand are: utilization of exhaust gas heat, ways to reduce emissions of harmful substances from the engine exhaust gases, optimization of the engine system parameters, the use of various fuels in internal combustion engines, including water-fuel emulsions and biofuels, control of the working process in the cylinder and torque measurement. It is emphasized that these directions are not the only possible ways to use this stand. The modernization of the engine systems and the stand is considered: air supply and gas outlet, fuel and cooling. It is shown that in order to control the parameters of the stand, a measuring complex is needed allowing continuous measuring of parameters, performing their processing, displaying, archiving and transferring to a computer that controls the stand operation.

**Keywords:** Engine tests, heat recovery boiler, experimental studies, engine systems, thermal measurements.

**Введение**

Исследования в области эксплуатации судовых энергетических установок требуют выполнения натуральных экспериментов на работающем оборудовании, в частности, на двигателях внутреннего сгорания. Кафедра эксплуатации судовых энергетических установок (ЭСЭУ) ФГБОУ ВО «ВГУВТ» имеет достаточно большой парк двигателей мощностью от 14 до 485 кВт. Однако с экономической точки зрения достаточно мощные и трудоемкие в обслуживании двигатели 6NVD48AU и 6L275 RrII/PN использовать для проведения исследований не всегда целесообразно. Значительный объем НИОКР может быть выполнен с использованием двигателей меньшей мощности и, соответственно, с меньшим расходом топлива. Например, в ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова для создания испытательных стендов [1, 2] использованы: двигатель 3 VD 14.5/12 мощностью 38 кВт, двигатель 2Ч11/13 мощностью 18,5 кВт и двигатель 4Ч8,5/11 мощностью 12,6 кВт, а в Астраханском государственном техническом университете для тех же задач [3] предполагается использовать двигатель Iveco 8041I06 55 R900 мощностью 36 кВт. По этой причине возникла задача создания многоцелевого испытательного стенда (МИС) на базе двигателя небольшой мощности, который бы обеспечил возможность проведения экспериментальных исследований по целому ряду направлений (рис. 1). К числу основных относятся: утилизация теплоты отработавших газов (охлаждающей воды, масла) двигателя; снижение выбросов вредных веществ в атмосферу и дымности отработавших газов двигателя; оптимизация параметров работы систем охлаждения и смазывания двигателя; вопросы измерения крутящего момента двигателя и исследования его рабочего процесса; исследование влияния на рабочий процесс различных сортов топлива, присадок к ним, а также водотопливных эмульсий и альтернативных видов топлива.

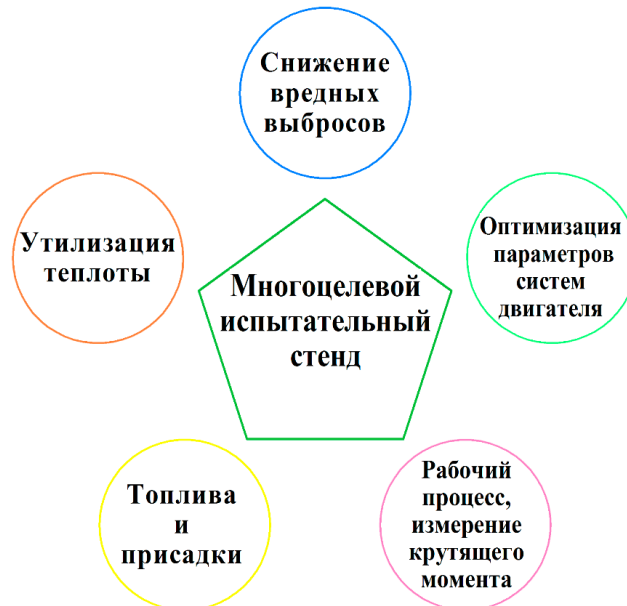


Рис. 1. Исследовательский потенциал многоцелевого испытательного стенда

Кроме того, для удобства проведения экспериментов и надежного документирования их результатов ставилась задача оснащения испытательного стенда современным комплексом мониторинга и архивирования параметров работы основных его элементов.

### Модернизация двигателя

Основой МИС стал дизель 2Ч 10.5/13 [4] Мелитопольского моторного завода (рис. 2). Несмотря на возраст, выбранный двигатель оказался вполне работоспособным и подходящим под требования поставленной задачи. Среди достоинств данного двигателя - небольшая мощность, а, следовательно, незначительный часовой расход топлива. Благодаря скромным массогабаритным показателям отдельных элементов, возможно быстро и нетрудоемко, без привлечения грузоподъемного оборудования, выполнять их обслуживание и замену. Возможность регулировки параметров топливоподачи по каждому отдельному цилиндру из-за наличия индивидуальных топливных насосов высокого давления явилась дополнительным преимуществом указанного дизеля. Основные его характеристики представлены в таблице 1.

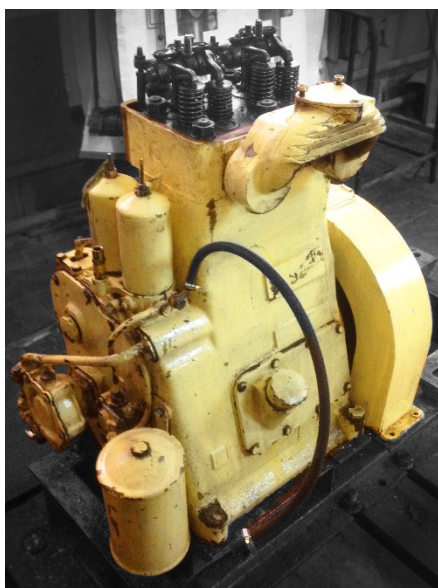


Рис. 2. Исходное состояние дизеля 2Ч 10.5/13

Таблица 1

Основные технические характеристики дизеля 2Ч 10.5/13

Тип	4-х тактный, с водяным охлаждением, без наддува
Мощность, кВт	14.7
Частота вращения коленчатого вала, об/мин	1500
Число цилиндров	2
Диаметр цилиндра, мм	105
Ход поршня, мм	130
Удельный расход топлива, г/(кВт·ч)	295

Ввиду значительного возраста двигателя, сказавшегося на состоянии некоторых его механизмов, узлов и деталей, был произведен ряд восстановительных работ. Были выполнены: переборка дизеля с заменой вышедших из строя элементов; восстановление системы смазывания; монтаж систем охлаждения и топливоподачи; настройка топливной аппаратуры и регулировка фаз газораспределения. Кроме того, была частично восстановлена штатная контрольно-измерительная система благодаря установке манометров на водяную и масляную магистрали.

Для возможности осуществления исследовательских задач были доработаны еще некоторые элементы выбранного двигателя. Конструкция оригинальной крышки цилиндра дизеля 2Ч 10.5/13 не предусматривает индикаторных кранов. По этой причине она была заменена на аналогичную крышку от двигателя 4Ч 10.5/13, в которой предусмотрены отверстия для свечей накаливания. Резьба в этих отверстиях совпадает с резьбой на установочных патрубках индикаторных кранов. Монтаж индикаторных кранов позволил в ходе настройки топливной аппаратуры дизеля провести индицирование рабочего процесса в его цилиндрах электронным индикатором DEPAS Handy [5] и, проанализировав полученные диаграммы, выполнить регулировку цикловой подачи и угла опережения подачи топлива с учетом особенностей данного двигателя. Однако отсутствие свечей накаливания в отверстиях установленной крышки привело к увеличению объема камер сгорания и, соответственно, снижению степени сжатия. По результатам расчета выяснилось, что степень сжатия уменьшилась с 17.5...18 до 13.5, вызвав падение температуры конца такта сжатия с 530...545 до 415...430°C. Для холодного двигателя эта температура будет еще ниже. Таким образом, температура в конце такта сжатия оказалась недостаточной для запуска двигателя.

Для исправления сложившейся ситуации было решено организовать систему предпускового подогрева воздуха, поступающего в цилиндры. Была переработана конструкция воздушного коллектора (рис. 3). Через входной патрубок 1 воздух поступает к нагревательным элементам камеры 2, которые представляют собой спираль накаливания мощностью 1600 Вт. Нагретый воздух посредством двух осевых вентиляторов 3, размещаемых между элементами 1 и 2, подается в цилиндры двигателя.

Для замеров расхода воздуха, поступающего в двигатель, во входном патрубке предусмотрен паз для анемометра, в отсутствие которого закрывающийся специальной заглушкой.

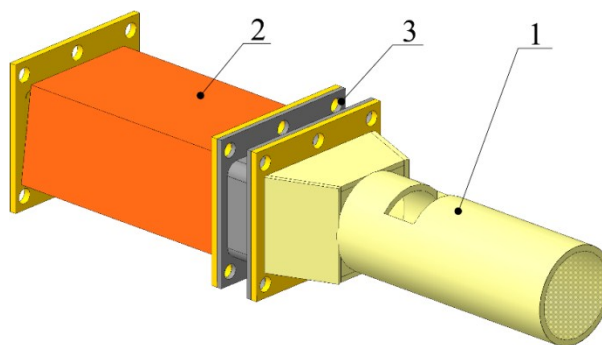


Рис. 3. Конструкция впускного воздушного коллектора: 1 – воздушный патрубок; 2 – камера предпускового подогрева воздуха; 3 – вентилятор



Но выполненные расчеты показали, что в этих условиях для надежного запуска двигателя подаваемый воздух пришлось бы нагревать до величины порядка 120°C. Для снижения этого значения до 45-60°C в образовавшийся индикаторный канал были установлены втулки-вытеснители с осевым отверстием. Это позволило увеличить степень сжатия с 13.5 до 14.5, тем самым сократив продолжительность предпускового прогрева.

### **Котел-утилизатор**

Одним из направлений, развиваемых на кафедре ЭСЭУ в течение длительного времени, является совершенствование теплообменного оборудования. Совместно со специалистами ООО «Гидротермаль» была разработана принципиальная схема компактного котла-утилизатора. На кафедре ЭСЭУ был выполнен тепловой расчет опытного котла-утилизатора и проведено компьютерное моделирование движения газа в CFD-пакете Flow Vision [6, 7]. Опираясь на параметры отработавших газов в выпускном коллекторе экспериментального дизеля, был спроектирован и изготовлен натуральный образец котла-утилизатора (рис. 4, а). Котел-утилизатор состоит из отдельных – теплообменной и перепускной – частей, основные элементы которых представлены на рисунках 4б и 4в соответственно.

Реализуемая в настоящее время программа исследований в области утилизации теплоты отработавших газов дизеля включает, в первую очередь, проверку результатов численного моделирования движения газов и теплообмена в каналах котла-утилизатора указанной конструкции. Данные испытания позволят сделать вывод о соответствии разработанной численной модели и полученного решения реальным физическим процессам, а также откорректировать математическую модель теплового расчета подобного котла-утилизатора, завершив ее разработку.

Кроме того, планируется серия самостоятельных экспериментов по определению влияния на тепловую и газодинамическую эффективность котла-утилизатора и на процессы, протекающие в его каналах, геометрических характеристик теплообменной секции котла-утилизатора, формы и положения его входного и выходного патрубков, положения регулирующего органа (газовой заслонки). По этой причине опытный образец котла-утилизатора обладает рядом конструктивных особенностей, заложенных на этапе проектирования.

Максимальная разборность опытного образца котла-утилизатора является одной из основных особенностей аппарата. Помимо разъемности перепускной и теплообменной частей, входной и выходной патрубки выполнены разъемными относительно корпуса перепускной части котла-утилизатора; элементы входного патрубка тоже представляют собой разъемную конструкцию. Теплообменная часть также разборная и состоит из корпуса, теплообменной секции и передней водяной камеры.

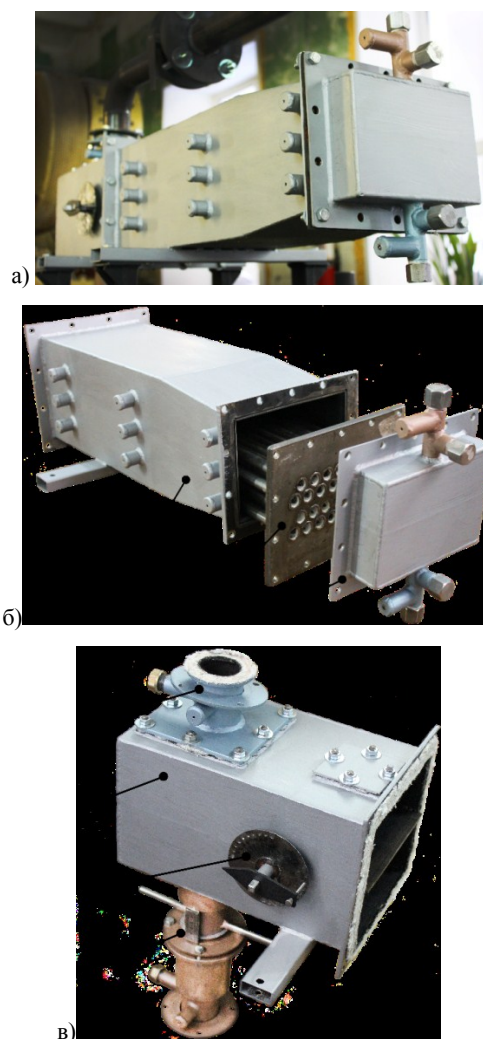


Рис. 4. Конструкция опытного образца компактного котла-утилизатора: а) опытный образец компактного котла-утилизатора в сборе; б) теплообменная часть опытного образца компактного котла-утилизатора: 1 – передняя водяная камера; 2 – теплообменная секция; 3 – корпус теплообменной секции; в) перепускная часть опытного образца компактного котла-утилизатора: 1 – входной патрубок; 2 – устройство регулирования положения газовой заслонки; 3 – корпус перепускной части; 4 – выходной патрубок

Предусмотрены 4 типоразмера теплообменных секций котла-утилизатора (рис. 5, а), отличающихся количеством трубок и их длиной, а также 2 типоразмера корпуса (рис. 5, б) под них.

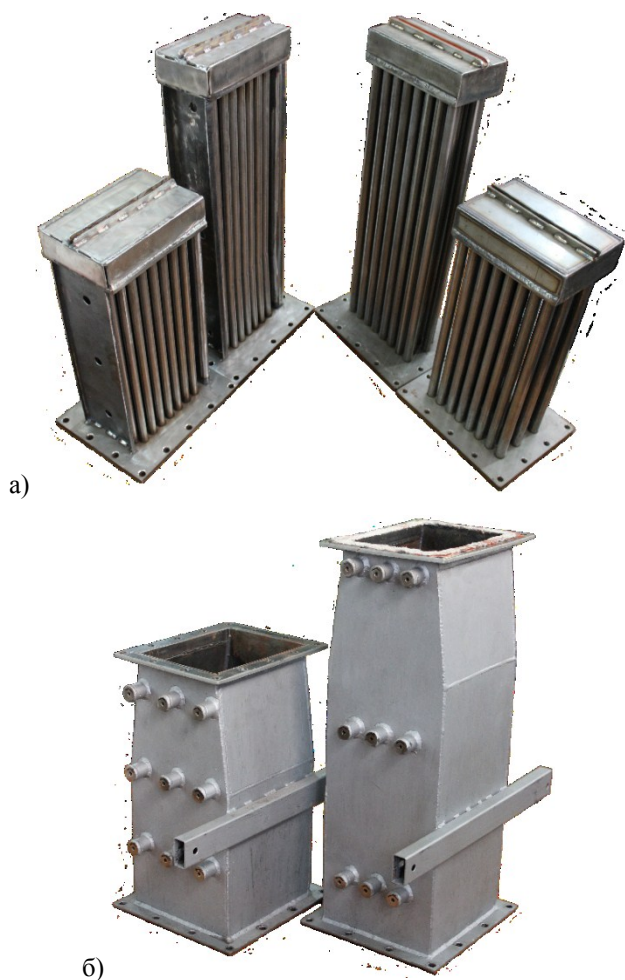


Рис. 5. Элементы теплообменной части опытного образца компактного котла-утилизатора: а) теплообменные секции 4-х типоразмеров; б) корпуса теплообменных секций 2-х типоразмеров

Газовая заслонка имеет возможность регулирования проходного сечения проточной части котла-утилизатора по установленному соосно указателю угла поворота заслонки. Тем самым изменяется расход газов через теплообменную секцию.

Технические характеристики опытного образца компактного котла-утилизатора представлены в таблице 2.

Таблица 2

**Технические характеристики опытного образца компактного котла-утилизатора**

Параметр	Значение
Расчетный массовый расход отработавших газов, кг/с	0,027
Расчетный массовый расход охлаждающей жидкости, кг/с	0,347
Температура отработавших газов на входе, °С	400
Расчетный передаваемый тепловой поток, кВт	6

Площадь теплообменной поверхности секций, м <sup>2</sup>	0,754	0,753	0,735	0,753
Масса (нетто), кг	42,2	39,4	42,7	39,7
Объем межтрубного пространства, м <sup>3</sup> *10 <sup>-3</sup>	28,28	22,817	28,12	22,681
Объем внутритрубного пространства, м <sup>3</sup> *10 <sup>-3</sup>	4,682	4,982	3,838	4,182

### Газовыпускная система

Под параметры выбранного дизеля и спроектированного опытного образца котла-утилизатора была разработана и изготовлена система газовойпуска (рис. 6). Поскольку стенд изначально задумывался как многоцелевой, то и при проектировании газохода была выбрана разветвленная схема, позволяющая задействовать в экспериментах необходимые пути газовойпуска. Так, например, несмотря на то, что котел-утилизатор имеет собственный байпасный канал, дополнительно изготовлен обводной газоход, идущий помимо котла-утилизатора. Он будет задействован в тех экспериментах, где поток газов от двигателя является объектом изучения (например, в случае анализа состава отработавших газов) или поставщиком теплоты (например, для термического обезвреживания нефтесодержащих вод).

В итоге, газовыпускная система включает газоход от двигателя, разветвляющийся на байпасный ход 1 и ход через котел-утилизатор 2. Направление движения отработавших газов задает ряд газовых межфланцевых заслонок 3. Для измерения температуры, давления, состава отработавших газов и дымности, а также возможности выполнения прочих исследовательских задач (например, состава отработавших газов при работе двигателя на различных видах и сортах топлива и т.д.) газовыпускная система содержит ряд штуцеров 4, размещенных в различных точках газоходов.

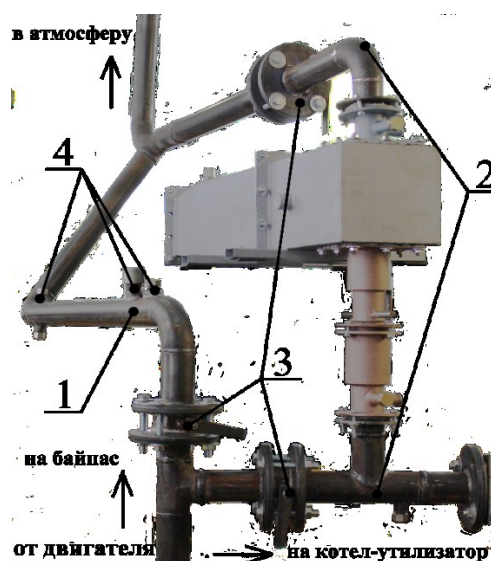


Рис. 6. Внешний вид системы газовойпуска

Наличие котла-утилизатора в системе газовойпуска потребовало создания несущей металлоконструкции для его надежного крепления, а также удобного обслуживания.

Была разработана и изготовлена рама, воспринимающая вес котла-утилизатора и, частично, вес газохода.

### **Системы двигателя и стенда**

Помимо газовыпускной системы и системы подачи нагретого воздуха в цилиндры двигателя были разработаны и смонтированы система топливоподачи, система подачи охлаждающей воды в двигатель (система охлаждения двигателя) и нагреваемой воды в котел-утилизатор (рис. 7).

Практически всегда при проведении экспериментов на двигателе исследователя интересует расход топлива. Разработанная для стенда система топливоподачи позволяет проводить измерения расхода топлива как массовым, так и объемным способом. Для этого перед пуском двигателя Д его топливный фильтр, топливопровод и топливные насосы высокого давления заполняются или топливоподкачивающим насосом НТП из мерного топливного бака, или самотеком из подпорной емкости БТП небольшого объема, расположенной выше уровня топливных насосов. Заполнение мерного топливного бака происходит также через подпорную емкость БТП. Краны КП13 – КП16 позволяют настроить систему на работу в нужном направлении. Для проведения обслуживания или ремонта системы вышеупомянутая арматура дополнена двумя кранами КП17 и КП18, расположенными на стороне топливоподготовки и двигателя соответственно. Для очистки топлива перед топливоподкачивающим насосом НТП в топливопровод вмонтирован фильтр предварительной очистки ФТ.

Для обеспечения автономности работы стенда система охлаждения двигателя выполнена объединенной с системой утилизации теплоты в котле-утилизаторе. Кроме того, учитывая непостоянный характер работы двигателя, система охлаждения выполнена одноконтурной, с запасом воды в циркуляционном баке объемом 1 м<sup>3</sup>. По нашим оценкам, такого запаса воды достаточно для работы дизеля с котлом-утилизатором в течение 1...1.5 часов, а без котла-утилизатора до 3 часов. Для большинства экспериментов этого вполне достаточно.

При работе дизеля Д охлаждающая вода из циркуляционного бака через фильтр ФГ1 поступает в полости охлаждения двигателя посредством навешенного на него циркуляционного насоса НЦ. Из двигателя вода движется к котлу-утилизатору, проходя повторную очистку в фильтре ФГ2. Подогретая в котле-утилизаторе, она направляется или обратно в циркуляционный бак, замыкая водяной контур, или сливается в накопительный бак. Заполнение системы водой осуществляется или из накопительного бака, или из санитарной системы здания лаборатории. Для возможности обслуживания отдельных элементов система охлаждения оснащена запорной арматурой КП1–КП12. Визуальный контроль за параметрами работы системы осуществляется с помощью манометра М после циркуляционного насоса НЦ и расходомером РВ после котла-утилизатора, а также путем установки прозрачных вставок из силиконового шланга.

### **Измерительный комплекс**

Для измерения, отображения и записи параметров работы двигателя, котла-утилизатора и других исследуемых объектов на стенде создается система мониторинга. Она включает в себя следующие компоненты:

В качестве датчиков температуры выступают термодпары типа К. Они измеряют температуру воды до и после двигателя (ТП1, ТП2), а также на входе и выходе котла-утилизатора (ТП3, ТП13); нагретого воздуха в воздушных коллекторах перед каждым цилиндром двигателя (ТП17, ТП18); топлива в топливном баке (ТП19); отработавших

газов на входе и выходе котла-утилизатора (ТП14, ТП15), и в 9-ти точках диаметрального сечения теплообменной секции котла-утилизатора (ТП4-ТП12), после двигателя (ТП16) и на различных участках газохода (на измерительных штуцерах Ш1-Ш4).

Для измерения давления воды в системе охлаждения двигателя используются датчики избыточного давления, а для определения перепада давления на входе и выходе котла-утилизатора - дифференциальные датчики давления.

Частота вращения коленчатого вала измеряется посредством оптических датчиков, а тензодатчики (тензорезисторы) являются основой устройства измерения расхода топлива.

Расход воды, проходящей через двигатель и котел-утилизатор, измеряет водомерный счетчик ВСКМ 90-15 ДГ «Атлант» с возможностью дистанционного съема показаний.

Сигнал от датчиков оцифровывается либо в специальных АЦП, часто скомпонованных в многоканальные блоки, либо непосредственно микроконтроллерами в блоках БРИЗ, где осуществляется сбор данных, их синхронизация и запись на карту памяти.

На базе контроллера можно построить весьма развитую систему мониторинга параметров судового оборудования [8], но полнофункциональным стенд будет лишь тогда, когда информация с контроллеров будет поступать на компьютер, где предусматривается их комплексная обработка. В перспективе такой компьютер может стать центром управления стендом.

Помимо штатных измерительных устройств стенд дополняется переносными средствами измерения. В частности, к ним относятся газоанализаторы ДАГ-510 МВ и АГМ-510 МВ, позволяющие вести запись состава отработавших газов в автоматическом режиме, и дымомеры МЕТА-01МП. Для забора газовой пробы предусмотрены штуцеры в нескольких точках газохода.

Замер расхода воздуха осуществляется портативным анемометром X-Line AeroTemp или аналогичным ему, устанавливаемым, при необходимости, в специальное прямоугольное отверстие в воздушном патрубке впускного воздушного коллектора (см. рис. 3).

Контроль параметров работы двигателя выполняется либо с помощью максиметра, либо с помощью электронного индикатора DEPAS Handy.

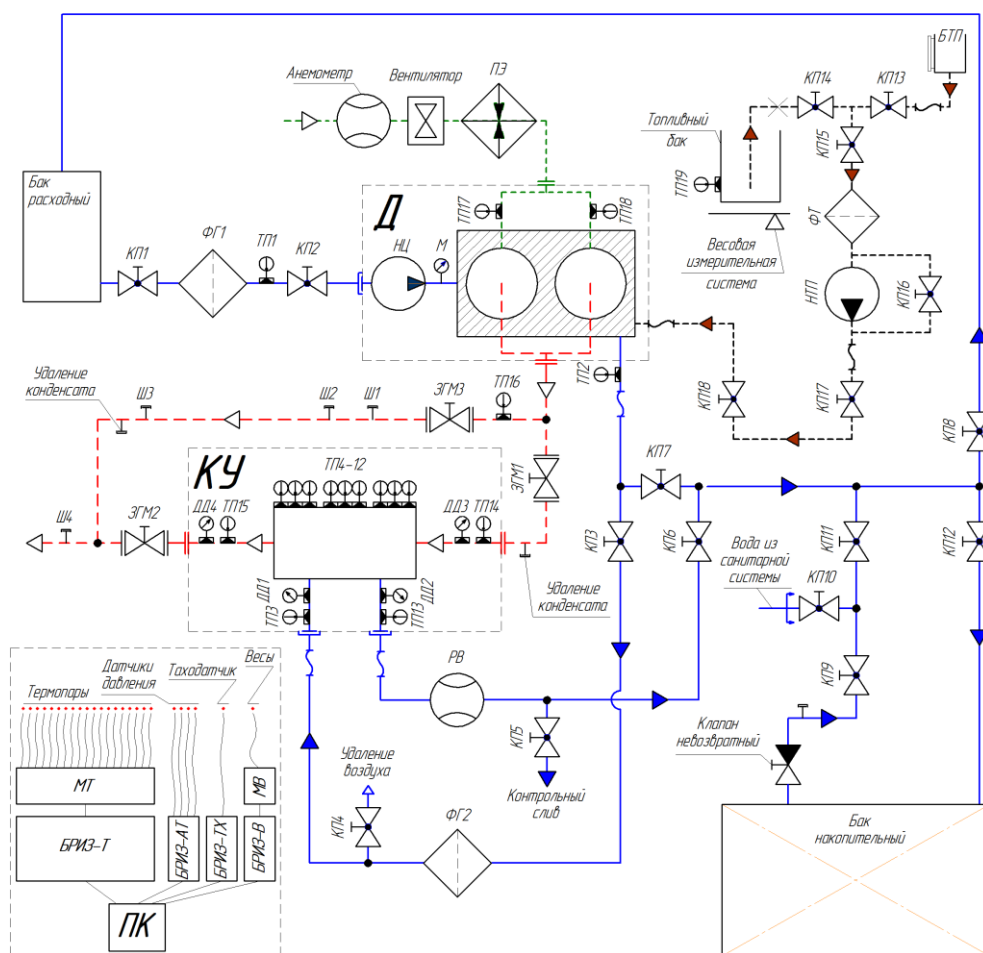


Рис. 7. Принципиальная схема многоцелевого испытательного стенда:

Д – дизель; КУ – котел-утилизатор; ПК – персональный компьютер; ПЭ – подогреватель электрический; НЦ – насос циркуляционный; НТП –насос топливоподкачивающий; БТП – бак топливный подпорный; ФГ – фильтр топливный; ФГ1-ФГ2 – фильтр-грязевик; ЗГМ1-ЗГМ3 – заслонка газовая межфланцевая; КП1-КП18 – кран проходной; Ш1-Ш4 – штуцер; РВ – расходомер водяной; М – манометр; ТП1-ТП19 – термopapa; ДД1-ДД4 – датчик давления; МТ – модуль термометрии; МВ – модуль весометрии; БРИЗ-Т – блок регистрации измерений термометрии; БРИЗ-АТ – блок регистрации измерений манометрии; БРИЗ-ТХ – блок регистрации измерений тахометрии; БРИЗ-В – блок регистрации весовых измерений

### Выводы

Разработанный МИС является компактным, современным, простым, удобным и незатратным в обслуживании испытательным стендом. На данный момент степень его готовности и оснащения позволяет проводить исследования почти по всем направлениям, оговоренным в начале статьи (см. рис. 1). Для окончательного решения поставленной задачи и для возможности проведения испытаний на заданном, устойчивом режиме работы двигателя необходимо создание нагрузочного устройства. В нашем случае этим устройством будет гидротормоз.

Потенциал МИС, очевидно, способен добавить к обозначенному кругу исследуемых вопросов возможность решения на стенде еще ряда задач в области эксплуатации судовых энергетических установок.

#### Список литературы

1. Макарьев Е. В. Стенд для теплосбалансных испытаний судовых ДВС. Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2014. № 5 (27). С. 12-19.
2. Безюков, О. К. Стенды, программы и методики для испытаний высокооборотных судовых дизелей / О. К. Безюков, Е. В. Макарьев, М. М. Махфуд // Сборник научных трудов профессорско-преподавательского состава Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова: сборник научных статей, Санкт-Петербург, 01 апреля – 20 октября 2017 года. – Санкт-Петербург: ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова», 2017. – С. 32-40. – EDN ZXDWVZ.
3. Покусаев, М. Н. Установка для испытания двигателя с энергоэффективной системой охлаждения / М. Н. Покусаев, А. В. Грифонов, В. А. Костыренко // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2021. – № 1(71). – С. 15-21. – DOI 10.24143/1812-9498-2021-1-15-21.
4. Вайнер М. А., Стационарные двигатели и дизель-генераторы 1Ч-2Ч 10,5/13-2, 1ЧА-2ЧА 10,5/13-2 и судовые двигатели 1ЧСП-2ЧСП 10,5/13-1. Описание конструкции и руководство по уходу / М. А. Вайнер, Е. С. Камахин // М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1950. – 128 с.
5. DEPAS D4.0H: URL: <http://depas.od.ua/products.html#Handy> 1.0 (дата обращения 21.12.2021).
6. Шураев О. П., Исследование полей скорости и температуры в каналах котла-утилизатора методом численного моделирования / О. П. Шураев, Д. И. Бевза, С. Н. Валиулин // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2016. № 3. С. 49 - 56.
7. Шураев О. П., Результаты численного моделирования движения газа в каналах компактного котла-утилизатора / О. П. Шураев, Д. И. Бевза, С. Н. Валиулин // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. - 2017. - № 50. - С. 268 - 276.
8. Перевезенцев С. В. Разработка стенда сбора и передачи береговым центрам технологической и путевой информации с судов с использованием АИС / С. В. Перевезенцев, В. И. Плющаев, И. С. Поляков // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2015. – № 44. – С. 130-133.

#### References

1. Makar'ev E. V. Stend dlya teplobalansnykh ispytaniy sudovykh DVS [Stand for thermal balance testing of ships' internal combustion engines]. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova. 2014. No. 5 (27). pp. 12-19.
2. Bezyukov, O. K. Stendy, programmy i metodiki dlya ispytaniy vysokooborotnykh sudovykh dizeley [Stands, programs and procedures for testing high-speed marine diesel engines]/ O. K. Bezyukov, E. V. Makar'ev, M. M. Makhfud // Sbornik nauchnykh trudov professorsko-prepodavatel'skogo sostava Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova: sbornik nauchnykh statey, Sankt-Peterburg, 01 aprelya – 20 oktyabrya 2017 goda. – Sankt-Peterburg: FGBOU VO «Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova». 2017. – pp. 32-40. – EDN ZXDWVZ.
3. Pokusaev, M. N. Ustanovka dlya ispytaniya dvigatelya s energoeffektivnoy sistemoy okhlazhdeniya [Testing plant for engine with energy efficient cooling system] / M. N. Pokusaev, A. V. Trifonov, V. A. Kostyrenko // Vestnik Astrakhansko-go gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2021. – № 1(71). – pp. 15-21. – DOI 10.24143/1812-9498-2021-1-15-21.



4. Vayner M. A., Statsionarnye dvigateli i dizel'-generatory 1CH-2CH 10,5/13-2, 1CHA-2CHA 10,5/13-2 i sudovye dvigateli 1CHSP-2CHSP 10,5/13-1 [Stationary engines and diesel generators 1CH-2CH 10.5/13-2, 1CH-2CH A 10.5/13-2 and marine engines 1CHSP-2CHSP 10.5/13-1. Description of the design and care guide] / M. A. Vayner, E. S. Kamakhin // М.: Gosudarstvennoe nauchno-tehnicheskoe izdatel'stvo mashinostroitel'noy literatury, 1950. – p.128.
5. DEPAS D4.0H. 21 Dec. 2021 <<http://depas.od.ua/products.html#Handy 1.0>>.
6. Shurayev O. P., Issledovanie polya skorosti i temperatury v kanalakh kotla-utilizatora metodom chislennogo modelirovaniya [The research of the speed and temperature fields in the flow passages of the exhaust heat boiler by the numerical experiment method] / O. P. Shurayev, D. I. Bevza, S. N. Valiulin // Vestnik AGTU. Ser.: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2016. № 3. pp. 49-56.
7. Shurayev O. P., Rezul'taty chislennogo modelirovaniya dvizheniya gaza v kanalakh kompakt-nogo kotla-utilizatora [The results of numerical modeling of gas dynamics in the ducts of a compact exhaust boiler] / O. P. Shurayev, D. I. Bevza, S. N. Valiulin // Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta. 2017. № 50. pp. 268 - 276.
8. Perevezentsev S. V. Razrabotka stenda sbora i peredachi beregovym tsentram tekhnologicheskoy i putevoy informatsii s sudov s ispol'zovaniem AIS [The stand development of collection and transfer to coast centers of technological and track information from vessels with using AIS] / S. V. Perevezentsev, V. I. Plyushchaev, I. S. Polyakov // Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta. – 2015. – № 44. – pp. 130-133.

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

**Шураев Олег Петрович**, к.т.н., доцент кафедры ЭСЭУ (Эксплуатации судовых энергетических установок) Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, г. Ниж  
e-mail: kaf\_eseu@vsuwt.ru

**Oleg P. Shurayev**, Candidate of Technical Science, Assistant Professor, The Department «Operation of Ship Power Plants», Volga state university of water transport, 5, Nesterova str, . Nizhny Novgorod, Russia

**Бевза Денис Игоревич**, аспирант кафедры ЭСЭУ (Эксплуатации судовых энергетических установок) Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, ауд. 667,  
e-mail: kaf\_eseu@vsuwt.ru

**Denis I. Bevza**, postgraduate, The Department «Operation of Ship Power Plants», Volga state university of water transport, 5, Nesterova str, . Nizhny Novgorod, Russia

Статья поступила в редакцию 21.02.2022; опубликована онлайн 07.06.2022.  
Received 21.02.2022; published online 07.06.2022.

**ЭКОНОМИКА, ЛОГИСТИКА И МЕНЕДЖМЕНТ НА  
ТРАНСПОРТЕ**

**ECONOMICS, LOGISTICS AND TRANSPORT MANAGEMENT**

УДК 629.5

DOI: 10.37890/jwt.vi71.259

**Критериальный подход в оптимизации параметров хаусботов  
как аспект инвестиционного выбора**

**С.Д. Гордлеев<sup>1</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0053-0506>

**О.Л. Трухинова<sup>1,2</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3423-9058>

**В.И. Тихонов<sup>1</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3147-0668>

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

<sup>2</sup>*Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Россия*

**Аннотация.** На основании качественного подхода приведены основные направления инвестиционного выбора при оптимизации параметров для пассажирских и прогулочных судов (в том числе хаусботов). Приведены способы поиска исходной информации для судов, инфраструктуры для них в различных состояниях (при проектировании, строительстве и эксплуатации). Дана краткая оценка влияния различных правил и регулирующих документов на способы инвестирования в малые суда. В статье представлен оригинальный подход к решению многокритериальной задачи оптимизации, заключающейся в выборе проекта пассажирского судна (хаусбота) в сочетании с определением предпочтений заказчика и других участников инвестиционного выбора. Результатом этого исследования является многокритериальная модель рассматриваемой ситуации принятия решения. Формулировка проблемы включает интересы различных заинтересованных сторон. Методология применяется к реальным проектам хаусботов, включает оценку заинтересованными сторонами четырех ключевых подходов к решению проблемы и алгоритм, способный решить сложную совместную задачу выбора.

**Ключевые слова:** судостроение, водный транспорт, хаусбот, плавучий дом, критерии выбора, многокритериальный анализ, многокритериальный инвестиционный выбор.

**Criterion approach in optimization of houseboat parameters as an  
aspect of investment choice**

**Sergei D. Gordleev<sup>1</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0053-0506>

**Olga L. Trukhinova<sup>1,2</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3423-9058>

**Vadim I. Tikhonov<sup>1</sup>**

ORCID: судна <https://orcid.org/0000-0002-3147-0668>

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

<sup>2</sup>*Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia*

**Abstract.** Based on the qualitative approach, the main directions of the investment choice in optimizing parameters for passenger and pleasure craft (including houseboats) are given. The methods of source information search for ships, infrastructure for them in various states (during design, construction and operation) are given. A brief assessment of various rules and regulatory documents effects on the investing in small vessels is given. The article presents an original approach to solving a multi-criteria optimization problem, which consists in choosing a passenger ship (houseboat) project in combination with determining the preferences of the customer and other participants in the investment choice. The result of this study is a multi-criteria model of the decision-making situation under consideration. The formulation of the problem includes the interests of various stakeholders. The methodology is applied to real houseboat projects, and includes the stakeholders' assessment of four key approaches to problem solving and the algorithm capable of fulfilling a complex joint selection task.

**Keywords:** shipbuilding, water transport, houseboat, choice criteria, multi-criteria analysis, multi-criteria investment choice.

### Введение

В соответствии с принятой повесткой государства по развитию транспорта, указанной в Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года продиктован ряд долгосрочных целей, среди которых – повышение мобильности населения и развитие внутреннего туризма. Также в данной стратегии формируется задача на удовлетворение ожиданий основных пользователей «за счет формирования технически, технологически и экономически сбалансированной на основе транспортно-экономического баланса транспортной системы и повышения профессионализма сотрудников транспортных организаций». Вместе с этим 28 января 2021 года Правительством РФ принята концепция развития круизного туризма в РФ на период до 2024 года, в которой явно отсутствует применение малых пассажирских и прогулочных судов, к которым относятся хаусботы, плавучие дома и т.д. Однако именно малые суда являются лучшим проектом для развития туристического направления с точки зрения привлечения инвестиций [1]. Строительство такого флота может быть успешным стартом и для больших предприятий, и для частных компаний, которые только знакомятся с рынком судостроения ввиду возможности отнесения хаусботов как к плавучим объектам, поднадзорным Российскому речному регистру, так и к ведению государственной инспекции по маломерным судам (далее – ГИМС) в зависимости от целей эксплуатации. Также имеются и другие возможности юридического статуса для данных судов.

Хаусботы имеют ряд преимуществ для заказчиков:

- возможность комфортабельного уединенного отдыха на воде, в естественных природных условиях;
- свободное перемещение объекта по водной поверхности в избранное заказчиком место швартовки;
- высокая маневренность и легкость управления;
- возможность швартоваться у необустроенного берега за счет малой осадки;
- устойчивость и безопасность;
- автономность и простота обслуживания;

- сравнительная несложность оформления документов по сравнению с коттеджем на земельном участке;
- экономия на налогах (не требуется уплата налога на недвижимость);
- возможность круглогодичного проживания.

При этом хаусботы можно использовать как одиночные суда, так и флотилиями, что позволяет говорить о разнообразных вариантах ведения туристического бизнеса в целом. Именно подход к выбору оптимальных характеристик создает понимание для инвестора, а классические методы системного моделирования, в том числе критериальная система оценки позволяет количественно и качественно оценить проект.

### **Методы**

В исследовании применялись статистические и аналитические методы: системное моделирование, методы принятия решений, математические методы, в том числе метод анализа иерархий Т. Саати, имеющий известность как один из лучших методов, позволяющих решать сложные многокритериальные задачи [2–9].

В качестве информационных источников использованы нормативно-правовые акты, научные труды отечественных и зарубежных ученых, отраслевые публикации, интервью с экспертами, техническая и проектная документация и др.

В качестве параметров и характеристик плавдомов и хаусботов рассматриваются площади палуб, объемы помещений, наличие удобств, основные эксплуатационные качества судна и пр. Подробно данные характеристики были рассмотрены в ряде трудов [10, 11, 12, 13]. Особый вклад в части оптимизации параметров пассажирских судов был сделан А.А. Сёминым, Е.П. Ронновым, В.И. Любимовым.

### **Результаты**

Известно, что результатом вложений в проект (в том числе проект судна) должна стать система, приносящая материальные и нематериальные блага, превышающие исходные вложения. При этом проектная составляющая является базовым элементом, который определяет КПД инвестиций. Исходя из данного определения при исследовании инвестором возможных моделей работы на рынке хаусботов одними из важнейших критериев будут:

- РР, мес. – срок окупаемости на весь проект или его часть;
- То, мес – срок, необходимый на завершение всех операций и пуск проекта;
- И, руб – Размер инвестиций;
- Кс, ед – количество согласований (операций) при работе над проектом;

При этом, если срок окупаемости и размер инвестиций являются наиболее понятными для всех инвесторов, то количество согласований (Кс, ед) характеризует специфику судостроительного рынка, а также является показателем сложности работ.

На рисунке 1 показана схема, характеризующая качественный подход в оценке инвестиций в проект с точки зрения возможности принятия оптимизационных решений. Очевидно, что по мере движения от выбора инвестиционного проекта «Судно-самострой» до «Суда, сдающиеся в аренду/чартер» сокращается возможность оптимизации судовых характеристик (ОСХ) хаусбота с уровня 100% (возможно всё изменять) до 0% (невозможно, потому что судно чужое).

Следует отметить, что инвестиционный выбор «Судно-самострой, теневая эксплуатация» выбран также не случайно, ввиду наличия случаев незаконного строительства и эксплуатации [14], что само по себе является интересным рынком для дальнейших исследований. В свою очередь яхты, катамараны, плавучие дома, которые представлены как предложения для аренды посуточно или на других условиях также являются существующим рынком, который может предъявлять требования к характеристикам СУДОВ.

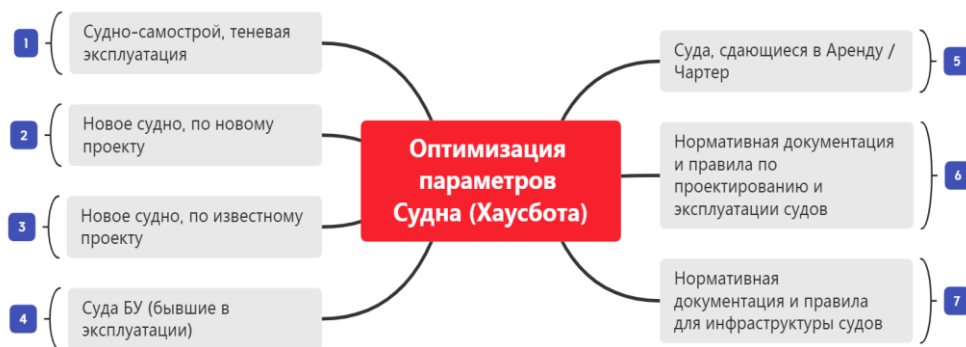


Рис. 1. Схема инвестиционного выбора и условий, влияющих на оптимизацию параметров судна (составлено авторами)

Особое внимание в работе с выбором инвестиционного проекта (рис.1) следует уделять нормативной документации и правилам по проектированию и эксплуатации судов, а также их инфраструктуры. Данный критерий зачастую не рассматривается всерьез и может привести в уже начавшийся проект серьезные коррективы.

В таблице 1 приведены показатели всех направлений инвестирования с учетом их качественной оценки.

Таблица 1

**Качественная оценка показателей по различным вариантам инвестирования**

Разделы	Показатели	Инвест,%	To, мес	Kc,%	ОСХ,%
1	<b>Судно-самострой</b>	16%	3	5%	100%
2	<b>Новые суда, по новым проектам</b>	-	-	-	60%
2.ТП	Проект технический (для контролирующих органов)	7%	2	20%	-
2.РП	Проект техно-рабочий (подробный, для всех)	25%	6	40%	-
2.1	<b>На имеющемся производстве</b>	-	-	-	-
2.1.1	Понятная (доступная) технология	250%	9	40%	-
2.1.2	с использованием новых технологий	350%	14	60%	-
2.2	<b>Производство нужно создавать</b>	-	-	-	-
2.2.1	Понятная (доступная) технология	450%	26	40%	-

2.2.2	с использованием новых технологий	600%	36	60%	-
3	Новые суда, по известному проекту	-	-	-	40%
3.ТП	Проект дополнений/изменений (не влияет на основные характеристики)	7%	2	10%	-
3.1	<b>На имеющемся производстве</b>	-	-	-	-
3.1.1	Понятная (доступная) технология	100%	4	30%	-
3.1.2	с использованием новых технологий	175%	9	50%	-
3.2	<b>Производство нужно создавать</b>	-	-	-	-
3.2.1	Понятная (доступная) технология	400%	24	30%	-
3.2.2	с использованием новых технологий	550%	34	50%	-
4	<b>Суда, бывшие в эксплуатации</b>	-	-	-	10%
4.1	Приемка судна	5%	1	3%	-
4.2	Дооснащение	10%	3	10%	-
4.3	Транспортировка	7%	1	-	-
5	<b>Суда в аренду / чартер</b>	2%	0,5	3%	2%
6	<b>Нормативная документация и правила по проектированию и эксплуатации судов (риски)</b>	-	-	-	-
6.1	Требования к качеству судна в части проекта	50%	9	-	-
6.2	Требования к качеству судна в части постройки	50%	12	-	-
6.3	Требования к качеству судна в эксплуатации	20%	6	-	-
6.4	Требования к экипажу	10%	3	-	-
7	<b>Нормативная документация и правила для инфраструктуры судов (риски)</b>	-	-	-	-
7.1	Условия размещения на местах стоянки	10%	2	-	-
7.2	Условия пользования инфраструктурой	5%	1	-	-
7.3	Требования к качеству и характеристикам инфраструктурных объектов флота	5%	1	-	-

Составлено авторами.

В данных таблицы 1 учтены инвестиции (Инвест, %) при различных вариациях выбора. При этом за 100% инвестиций принималась среднерыночная стоимость хаусботов в Российской Федерации на конец 2021 года, что составляло около 5 млн. руб. за судно на 6 человек, поднадзорное ГИМС. В части разделов 6 и 7 таблицы

приведены риски, связанные с необходимостью следования правилам и нормам. Время на завершение всех операций ( $T_0$ , мес) на том или ином этапе показывается в календарных месяцах исходя из условий, что рассматривается хаусбот длиной корпуса не более 20 м, не выше двух ярусов. Количество согласований также отражает степень детализации работ и их одобрение регулируемыми органами. Степень оптимизации судовых характеристик показывает, какой процент изменений в проект судна может внести заказчик для получения оптимального результата.

Выбор инвестором (заказчиком) проекта малого судна (хаусбота) сопряжен с рядом факторов, осложняющих принятие решения. К таким факторам можно отнести:

- риск, неопределенность;
- изменчивость условий экзогенного характера,
- влияние интересов других стейкхолдеров и необходимость их учета,
- множество разнообразных и разнонаправленных критериев (характеристик) альтернатив,
- отсутствие единого подхода к процессу выбора альтернатив.

Сложность заключается в том, что необходимо учитывать и сопоставлять оценки множества альтернатив, позиции заинтересованных сторон с использованием множества критериев и предусматривать возможные последствия принимаемых решений. Для получения сбалансированного инвестиционного решения предлагается применять модифицированный метод анализа иерархий [15, 16, 17].

Методической основой использованного в исследовании подхода является метод анализа иерархий Т. Саати (Analytic Hierarchy Process, АНР) [6, 7]. Метод представляет собой попарное сравнение различных критериев в иерархической матричной системе, применяется многими учеными в разных сферах деятельности, в том числе при принятии решений по инвестированию на транспорте. В работе [18] авторы М. Хойда, Я. Жак и Г. Фильчек показали, что метод можно эффективно использовать при решении задачи многокритериальной оптимизации выбора транспортных средств и маршрутов при участии нескольких заинтересованных сторон. Н.А. Оснин и Н.Ш. Фитри Абдул Рахман проанализировали с помощью АНР возможности внутреннего судоходства с учетом множества количественных и качественных данных, в том числе уделили особое внимание малому флоту, включая плавучие дома [3]. В исследованиях И. Марович, М. Перич, Т. Ханак [19] и Х. П. Хидаят Путро, П. Прадоно и Т. Х. Сетиаван [20] представлено важное преимущество многокритериального метода, позволяющего оценивать позиции разных заинтересованных сторон, что расширяет возможности развития исходного метода.

Методика осуществления инвестиционного выбора основана на подходах, представленных на рис. 2 и рис. 3, которые в целом рассматриваются как единая система принятия решения. Начальная стадия первого этапа многокритериального выбора (рис. 2) представляет собой подсистему определения проблемной ситуации, в которой находится заказчик. При этом происходит формализация предпочтений заказчика и определение его подхода к решению проблемы.



Рис. 2. Содержание начальной стадии (1.1) первого этапа многокритериального инвестиционного выбора – подсистема определения проблемной ситуации и идентификации подхода к решению проблемы выбора (составлено авторами)

В случае, если заказчик не располагает достаточным для полного решения проблемы (максимального удовлетворения потребностей) количеством ресурсов и проблема не является критичной, выбирается «подход 1 («Отдалить срок наступления критичности расхождений»)). При том же уровне наличия ресурсов, но критичности проблемы (необходимости срочно принимать решения), рекомендован подход 2 («В короткий срок устранить наиболее критичные расхождения»)). При наличии критичной проблемы, если заказчик располагает достаточными ресурсами для ее полного решения, используется подход 3 («В короткий срок и полностью устранить имеющиеся расхождения»)). Достаточное количество ресурсов и некритичная проблема приводит к четвертому подходу («Устранить возможность возникновения расхождений на длительную перспективу»)) [15, 16]. Алгоритм выбора в дальнейшем определяется конкретным типом подхода (одним из вышеописанных четырех типов) к решению проблемы, как ключевой характеристике состояния подсистемы определения проблемной ситуации.

Формализация многокритериального выбора на следующих этапах процедуры инвестиционного решения основывается на обобщенных критериях выбора, предложенных международными и российскими стандартами качества ИСО, которые являются общепризнанными в России и за рубежом: удовлетворенности (У), эффективности (Э), результативности (Р) (рис. 3). Однако для их практического применения требуется конкретизировать и декомпозировать указанные обобщенные критерии в соответствии с областью принятия решений. В нашем исследовании данные критерии связаны с характеристиками хаусботов как объектов инвестирования.





Рис. 3. Предложенные международными и российскими стандартами качества ИСО обобщенные критерии выбора. (составлено авторами)

Модель многокритериального инвестиционного выбора состоит из двух основных этапов. Первым этапом модели является формализация задачи многокритериального выбора, исходная стадия которой в виде подсистемы определения проблемной ситуации и идентификации подхода к решению проблемы выбора рассмотрена выше на рис. 2. Второй этап представляет собой обоснование многокритериального инвестиционного выбора.

Как отмечалось, в результате типологического определения проблемной ситуации определяется тип подхода, характеризующий дальнейшую стратегию принятия решения. На втором шаге происходит установление приоритетов заказчика в виде рангов обобщенных критериев выбора УЭР. Чувствительность критериев и их соотношение может определяться экспертным путем либо с помощью математических методов [15, 16, 21, 22].

В целом предлагаемая методика инвестиционного выбора позволяет:

- учитывать требования противоположных заинтересованных сторон;
- повышает прозрачность последовательности процесса принятия решений;
- повышает обоснованность конечного результата выбора альтернативы;
- представляет собой научный подход с большим потенциалом для применения к аналогичным проблемам принятия инвестиционных решений, где необходимы устойчивые результаты.

### **Заключение**

Представленные методы исследования инвестиционного выбора и их влияние на оптимизацию параметров хаусботов позволяют сформировать новые направления исследований для растущего рынка малых туристических и круизных судов. Например, использование имеющихся сведений о чартерных катамаранах позволяет создать большую выборку по ключевым характеристикам (площадь кают, удобства и пр.). Результаты исследования показывают возможность вовлечения в инвестиционный процесс большего количества заинтересованных участников. Помимо государственных лизинговых компаний и крупного бизнеса в направлении

строительства хаусботов могут входить субъекты малого и среднего предпринимательства. Это даст возможность включить противоречивые интересы сторон в формулировку проблемы и сбалансировать их, чтобы найти компромиссное решение. Дальнейшие исследования могут включать уточненные модели многокритериального выбора для принятия инвестиционных решений.

#### Список литературы

1. Нигматуллин Р. Браконьеры строят плавучие дома, значит, имеют экономическую базу // Официальный сайт компании ИА «Татар-информ» [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.tatar-inform.ru/news/plavucie-doma-nuzno-likvidirovat-v-2022-godu-uzestocat-kon> (дата обращения: 04.05.2022).
2. González-Prida V., Barberá L., Viveros P., Crespo Dynamic A. Analytic Hierarchy Process: AHP method adapted to a changing environment // IFAC Proceedings Volumes. 2012. Vol. 45, Is. 31, Pp. 25-29). <https://doi.org/10.3182/20121122-2-ES-4026.00005>
3. Osnin N. A., Fitri Abdul Rahman N. S. Assessment and Ranking of Inland Navigation Practices in Malaysia: The Case of Kenyir Lake // The Asian Journal of Shipping and Logistics. 2018. Vol. 34, Is. 4, . Pp. 289-296). <https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2018.12.002>
4. Mohammed O., Khumbulani Mpofo O. Appraisal of conceptual designs: Coalescing fuzzy analytic hierarchy process (F-AHP) and fuzzy grey relational analysis (F-GRA) // Results in Engineering. 2021. Vol. 9. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100194>
5. Eugenio L. J. AHP-express: A simplified version of the analytical hierarchy process method // MethodsX. 2020. Vol. 7, 100748. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.11.021>
6. Saaty T. L., Kearns K.P., Analytical Planning: The Organization of Systems, Pergamon 1st Edition, 1985. – p. 216.
7. Saaty, T. L. The Analytic Hierarchy Process; McGraw-Hill International: New York, NY, USA, 1980.
8. Hazir, O.A. A review of analytical models, approaches and decision support tools in project monitoring and control. Int. J. Proj. Manag. 2015, 33, 808–815.
9. Macharis, C.; de Witte, A.; Ampe, J. The multi-actor, multi-criteria analysis methodology (MAMCA) for the evaluation of transport projects: Theory and practice. J. Adv. Transp. 2010, 43, 183–202.
10. Сёмин А.А. Особенности выбора главных элементов пассажирских судов внутреннего и смешанного плавания на начальных стадиях проектирования // Вісник Одеського Національного морського університету: збірник наукових праць. Одеса: ОНМУ, 2005. Випуск 18. С. 102-112
11. Беляев И.В., Сёмин А.А., Повышение комфортабельности круизных судов, как фактор роста их конкурентоспособности // Транспортное дело России. 2009. №2. С. 28-31
12. Назаров А.Г. О пропорциях катамаранов и нормировании их остойчивости // Научные проблемы водного транспорта. 2021. №68. С. 88-97. DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi68.203>
13. Гордлеева И.Ю., Гордлеев С.Д., Никитаев И.В., Обзор импортозамещения на рынке хаусботов и предложение по выбору силового агрегата с применением гидроприводов // Научные проблемы водного транспорта. 2021. № 68. С. 40-58. DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi68.212>
14. Правительство изучит возможности постройки на водоемах плавучих домов // Официальный сайт компании АО «РОСБИЗНЕСКОНСАЛТИНГ» [Электронный ресурс]. — URL: <https://realty.rbc.ru/news/602239079a7947536d08ce00> (дата обращения: 04.05.2022).
15. Железнов С.В., Трухинова О.Л. Иерархическая модель обоснования стратегии, политики и успешного выбора в процессе конкурентного способа размещения заказа // Экономика и предпринимательство. 2012. № 5 (28). С. 401-409.
16. Трухинова О.Л. Методы выбора решений по размещению проектов в условиях кризиса // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2016. № 48. С. 189-196.

17. Щепетова С.Е., Трухинова О.Л. Организация взаимодействия участников инвестиционного процесса на основе системного обоснования многокритериального выбора // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2021. Т. 12. № 2. С. 114-127.
18. Hojdaa M., Žakb J., Filcek G. Multiple Criteria Optimization of Transportation Jobs Selection and Vehicle Routing Problems for a Small Road Freight Transportation Fleet // Transportation Research Procedia. 2018. Vol. 30, Pp. 178-187. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.09.020>
19. Marović I., Perić M., Hanak T. Multi-Criteria Decision Support Concept for Selecting the Optimal Contractor // Applied Sciences. 2021. Vol. 11, Is. 4. <https://doi.org/10.3390/app11041660>
20. Hidayat Putro H. P., Pradono P., Setiawan T. H. Development of Multi-Actor Multi-Criteria Analysis Based on the Weight of Stakeholder Involvement in the Assessment of Natural-Cultural Tourism Area Transportation Policies // Algorithms. 2021 Vol. 14, Is. 7. <https://doi.org/10.3390/a14070217>
21. Трухинова О.Л. Обоснование значимости стратегических групп показателей при выборе стратегии инвестирования // I Всероссийский научно-практический семинар «Актуальные проблемы экономики и бухгалтерского учета», Н. Новгород, НИГУ, Сборник научных статей, 2017. С. 63-68.
22. Amenta P., Lucadamo A., Marcarelli G. On the choice of weights for aggregating judgments in non-negotiable AHP group decision making // European Journal of Operational Research. 2021. Vol. 288, Is. 1, Pp. 294–301. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.05.048>

#### References

1. Nigmatullin R. *Brakon'ery stroyat plavuchie doma, znachit, imeyut ehkonomicheskuyu bazu* [Poachers build houseboats, which means they have an economic base]. The official website of IA "Tatar-inform" // [Electronic resource]. — URL: <https://www.tatar-inform.ru/news/plavucie-doma-nuzno-likvidirovat-v-2022-godu-uzestocat-kontrol-na-vodoemah-tatarstana-5847971> (accessed: 04.05.2022)
2. González-Prida V., Barberá L., Viveros P., Crespo Dynamic A. Analytic Hierarchy Process: AHP method adapted to a changing environment // IFAC Proceedings Volumes. 2012. Vol. 45, Is. 31, Pp. 25-29). <https://doi.org/10.3182/20121122-2-ES-4026.00005>
3. Osnin N. A., Fitri Abdul Rahman N. S. Assessment and Ranking of Inland Navigation Practices in Malaysia: The Case of Kenyir Lake // The Asian Journal of Shipping and Logistics. 2018. Vol. 34, Is. 4, . Pp. 289-296). <https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2018.12.002>
4. Mohammed O., Khumbulani Mpfu O. Appraisal of conceptual designs: Coalescing fuzzy analytic hierarchy process (F-AHP) and fuzzy grey relational analysis (F-GRA) // Results in Engineering. 2021. Vol. 9. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100194>
5. Eugenio L. J. AHP-express: A simplified version of the analytical hierarchy process method // MethodsX. 2020. Vol. 7, 100748. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.11.021>
6. Saaty T. L., Kearns K.P., Analytical Planning: The Organization of Systems, Pergamon1st Edition, 1985. – p. 216.
7. Saaty, T. L. The Analytic Hierarchy Process; McGraw-Hill International: New York, NY, USA, 1980.
8. Hazir, O.A. A review of analytical models, approaches and decision support tools in project monitoring and control. Int. J. Proj. Manag. 2015, 33, 808–815.
9. Macharis, C.; de Witte, A.; Ampe, J. The multi-actor, multi-criteria analysis methodology (MAMCA) for the evaluation of transport projects: Theory and practice. J. Adv. Transp. 2010, 43, 183–202.
10. Semin A. A. *Osobennosti vybora glavnykh ehlementov passazhirskikh sudov vnutrennego i smeshannogo plavaniya na nachal'nykh stadiyakh proektirovaniya* [Features of the choice of the main elements of passenger vessels of internal and mixed navigation at the initial stages of design] Visnik of the Odessa conception of maritime unity: collection of scientific practices. Odessa: ONMU, 2005. Vipusk 18. pp. 102-112. (In Russ)
11. Belyaev I.V., Semin A.A *Povyshenie komfortabel'nosti kruiznykh sudov, kak faktor rosta ikh konkurentosposobnosti* [Increasing the comfort of cruise ships as a factor in the growth of their competitiveness] Transport business of Russia. 2009. No. 2. pp. 28-31. (In Russ)

12. Nazarov A.G. O proporsiyakh katamaranov i normirovaniy ikh ostoichivosti [On proportions of catamarans and regulation of their stability] *Russian Journal of Water Transport*. 2021. No.68. pp. 88-97. (In Russ). DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi68.203>
13. Gordeeva I.Yu., Gordeev S.D., Nikitaev I.V. Obzor importozameshcheniya na rynke khausbotov i predlozhenie po vyboru silovogo agregata s primeneniem gidroprivodov [Overview of import substitution in the houseboat market and a proposal for choosing a power unit using hydraulic drives] *Russian Journal of Water Transport*. 2021. No.68. pp. 40-58. (In Russ). DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi68.212>
14. *Pravitel'stvo izuchit vozmozhnosti postroiki na vodoemakh plavuchikh domov* [The government will study the possibilities of building floating houses on reservoirs] // The official website of JSC "ROSBIZNESKONSALTING" // [Electronic resource]. — URL: <https://realty.rbc.ru/news/602239079a7947536d08ce00> (accessed: 04.05.2022).
15. Zheleznov S.V., Trukhinova O.L. *Ierarkhicheskaya model' obosnovaniya strategii, politiki i uspeshnogo vybora v protsesse konkurentnogo sposoba razmeshcheniya zakaza* [Hierarchical model of justification of strategy, policy and successful choice in the process of competitive method of placing an order] // *Ehkonomika i predprinimatel'stvo*. 2012. No. 5 (28). pp. 401-409. (In Russ).
16. Trukhinova O.L. *Metody vybora reshenii po razmeshcheniyu projektov v usloviyakh krizisa* [Methods of choosing solutions for the placement of projects in a crisis] // *Vestnik Volzhskoi gosudarstvennoi akademii vodnogo transporta*. 2016. № 48. S. 189-196.
17. Shechetova S.E., Trukhinova O.L. *Organizatsiya vzaimodeistviya uchastnikov investitsionnogo protsessa na osnove sistemnogo obosnovaniya mnogokriterial'nogo vybora* [Organization of interaction of participants in the investment process on the basis of a system justification of a multi-criteria choice] // *MIR (Modernizatsiya. Innovatsii. Razvitie)*. 2021. T. 12. № 2. S. 114-127.
18. Hojdaa M., Žakb J., Filcek G. Multiple Criteria Optimization of Transportation Jobs Selection and Vehicle Routing Problems for a Small Road Freight Transportation Fleet // *Transportation Research Procedia*. 2018. Vol. 30, Pp. 178-187. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.09.020>
19. Marović I., Perić M., Hanak T. Multi-Criteria Decision Support Concept for Selecting the Optimal Contractor // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, Is. 4. <https://doi.org/10.3390/app11041660>
20. Hidayat Putro H. P., Pradono P., Setiawan T. H. Development of Multi-Actor Multi-Criteria Analysis Based on the Weight of Stakeholder Involvement in the Assessment of Natural-Cultural Tourism Area Transportation Policies // *Algorithms*. 2021 Vol. 14, Is. 7. <https://doi.org/10.3390/a14070217>
21. Trukhinova O.L. *Obosnovanie znachimosti strategicheskikh grupp pokazatelei pri vybore strategii investirovaniya* [Substantiation of the importance of strategic groups of indicators when choosing an investment strategy] // *I Vserossiiskii nauchno-prakticheskii seminar «Aktual'nye problemy ehkonomiki i bukhgalterskogo ucheta»*, N. Novgorod, NNGU, *Sbornik nauchnykh statei*, 2017. S. 63-68.
22. Amenta P., Lucadamo A., Marcarelli G. On the choice of weights for aggregating judgments in non-negotiable AHP group decision making // *European Journal of Operational Research*. 2021. Vol. 288, Is. 1, Pp. 294–301. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.05.048>

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

**Гордлеев Сергей Дмитриевич**, Начальник УННИД, Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: [gordleev@vsawt.com](mailto:gordleev@vsawt.com)

**Sergey D. Gordleev**, Head of UNNID, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951, e-mail: [gordleev@vsawt.com](mailto:gordleev@vsawt.com)

**Трухинова Ольга Леонидовна**, к.э.н., 1) доцент кафедры Бухгалтерского учета, анализа и финансов, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО

**Olga L. Trukhinova**, PhD in Economics, 1) Associate Professor of the Department of Accounting, Analysis and Finance Volga

«ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5  
2) старший преподаватель кафедры Системный анализ в экономике, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (ФГБОУ ВО «Финансовый университет при Правительстве РФ»), 125993 (ГСП-3), г. Москва, Ленинградский просп., 49  
e-mail: truhinova@mail.ru

**Тихонов Вадим Иванович**, д.т.н., доцент, профессор кафедры судоходства и безопасности судоходства, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5  
e-mail: vitnn12@mail.ru

State University of Water Transport (VSUWT), 5, Nesterova street, Nizhny Novgorod, Russia, 603951  
2) Senior lecturer of the Department of System Analysis in Economics Financial University under the Government of the Russian Federation, 49, Leningradsky prospect, Moscow, Russia, 125993  
e-mail: truhinova@mail.ru

**Vadim I. Tikhonov**, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of navigation and safety described shipping, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951  
e-mail: vitnn12@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13.05.2022; опубликована онлайн 07.06.2022.  
Received 13.05.2022; published online 07.06.2022.

УДК 627.215.2: 656.028  
DOI: 10.37890/jwt.vi71.261

## **Организация взаимодействия различных видов транспорта в производственно-транспортных процессах добычи и доставки нерудных строительных материалов**

**Е.С. Жендарева<sup>1</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4364-6795>

**Е.С. Кадникова<sup>1</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6495-2754>

**А.В. Гюнтер<sup>1</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0508-2626>

<sup>1</sup>*Сибирский государственный университет водного транспорта,  
г. Новосибирск, Россия*

**Аннотация.** Производственно-транспортные процессы доставки нерудных строительных материалов начинаются, как правило, на обводнённых или сухопутных карьерах, а завершаются у потребителя. В статье рассмотрены особенности производственно-транспортных процессов добычи, перевозки, выгрузки и отгрузки на смежные виды транспорта нерудных строительных материалов русловой добычи на примере предприятий Обского бассейна. Выявлены факторы, определяющие эффективность взаимодействия различных видов транспорта в мультимодальных транспортных узлах. На примере одного из крупнейших речных предприятий Обского бассейна – АО «Томская судоходная компания» выполнен анализ эксплуатационных показателей работы флота, продолжительности круговых рейсов, определены пункты с наибольшими простоями судов, а также рассчитана величина удельного простоя из расчёта на 1000 тонн перевезённых грузов. Приведено решение задачи по согласованию взаимодействия речного и автомобильного транспорта на примере выгрузки щебня в речном порту Нижневартовск с учётом имеющихся складских площадей.

**Ключевые слова:** речной порт, речной транспорт Сибири, мультимодальный транспортный узел, нерудные строительные материалы, круговой рейс судна, простой судна, взаимодействие видов транспорта, производственно-транспортный процесс.

## **Organization of various transport modes interaction in the production and transportation processes of extraction and delivery of non-ferrous construction materials**

**Elena S. Zhendareva<sup>1</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4364-6795>

**Elena S. Kadnikova<sup>1</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6495-2754>

**Alexey V. Giunter<sup>1</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0508-2626>

<sup>1</sup>*Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia*

**Abstract.** Production and transportation processes of non-metallic construction materials delivery begin, as a rule, at flooded or land quarries, and end at the consumer. The article considers the features of production and transport processes of extraction, transportation, unloading and shipment of non-ferrous construction materials of channel mining to adjacent

modes of transport on the example of enterprises of the Ob basin. The factors determining the efficiency of various transport modes interaction in multimodal transport hubs are revealed. On the example of one of the largest river enterprises of the Ob basin – JSC "Tomsk Shipping Company", the analysis of the operational performance of the fleet, the duration of round trips was carried out, the points with the greatest ship downtime were identified, and the value of specific downtime was calculated based on 1000 tons of transported cargo. The solution of the problem concerning river and road transport interaction coordination is given on the example of crushed stone unloading in the river port of Nizhnevartovsk, considering the available storage areas.

**Keywords:** river port, Siberian river transport, multimodal hub, non-ferrous construction materials, circular voyage of the vessel, vessel idle time, interaction of transport modes, production and transportation process.

### **Введение**

В грузообороте речных предприятий Сибири такие грузы, как щебень, песок, песчано-гравийная смесь имеют наибольший удельный вес. При этом речной транспорт выступает как начальное или промежуточное звено производственно-транспортного процесса и взаимодействует с железнодорожным или автомобильным транспортом при доставке нерудных строительных материалов до конечного потребителя. Нерудные строительные материалы (НСМ) доставляются до потребителей, как правило, двумя и более видами транспорта. Песок, песчано-гравийная смесь и гравий добываются преимущественно из русловых и пойменных месторождений с одновременной погрузкой в судно. Исключение составляет доставка НСМ потребителям, имеющим собственные причалы, непосредственно связанные с производственно-транспортными циклами добычи и перевозки. Производство щебня осуществляют на сухопутных карьерах или дробильно-сортировочных комплексах, доставляя в порты автомобильным или железнодорожным транспортом для последующей перевозки. Целью настоящего исследования является разработка алгоритма и решение задачи организации взаимодействия речного и автомобильного транспорта в пунктах выгрузки НСМ.

Проблемам организации производственно-транспортных процессов добычи и доставки НСМ посвящены исследования многих советских и российских учёных: Н.В. Бажана, А.М. Быкова, О.Л. Домниной, А.А. Кичигина, Д.А. Коршунова, В.Н. Кострова, Е.Е. Котова, А.А. Лисина, Е.Н. Лоскутова, А.О. Ничипорука, А.Г. Прохорова, Н.И. Ильина, Е.С. Сидорка, Н.М. Суховой, М.А. Матюгина, А.И. Телегина, В.В. Цверова, И.В. Цыркуновой, Н.М. Яичникова, и др. Различные аспекты взаимодействия видов транспорта отражены в научных трудах И.Я. Аксенова, Е.Д. Бучина, В.Г. Винокурова, В.Л. Зюзина, А.Г. Кирилловой, А.М. Гаджинского, К.Г. Гусевой, Л.А. Когана, А.М. Козлова, А.Л. Кузнецова, П.В. Куренкова, В.Н. Кустова, Э.Л. Лимонова, Д.А. Ломаша, О.Б. Маликова, С.В. Милославской, В.М. Николашина, В.В. Повороженко, Н.В. Правдина, В.Я. Негрея, П.К. Рыбина, А.А. Смехова, А.Л. Степанова и др.

Правительство РФ обращает особое внимание на показатели качества транспортного обслуживания. Критерии его эффективности обозначены в «Транспортной стратегии РФ на период до 2030 года». Среди них – такие показатели, как скорость, своевременность, предсказуемость, ритмичность, безопасность, экологичность [1]. Поэтому в современных условиях решение задач по улучшению взаимодействия смежных видов транспорта, а именно – ритмичности, скорости и своевременности доставки, несомненно, актуально.

## Методы

Настоящее исследование основано на изучении опыта функционирования речных производственно-транспортных комплексов добычи и доставки НСМ [2–6]. Используются методы имитационного моделирования, элементы теории вероятности и математической статистики, информационные технологии.

Добычу и транспортировку НСМ осуществляют порты, пароходства и судоходные компании; для многих этот вид деятельности является наиболее рентабельным. При организации производственно-транспортного процесса применяются следующие схемы взаимодействия порта и клиента:

- погрузка в судно порта, перевозка на причал порта, выгрузка силами и средствами порта, хранение и отгрузка клиенту на авто- или ж/д транспорт;
- погрузка в судно порта, перевозка на причал клиента, выгрузка силами и средствами порта либо клиента (чаще всего плавкранами);
- отгрузка в судно клиента непосредственно на карьере [7].

Наиболее распространённой схемой взаимодействия порта и клиента в производственно-транспортном процессе добычи и доставки НСМ является первая, при реализации которой задачи рациональной организации взаимодействия речного и сухопутных видов транспорта возникают неизбежно. Основными видами взаимодействия транспорта являются:

- организация смешанного железнодорожно-водного сообщения, при котором перевозочный процесс, начатый на одном виде транспорта, продолжается с пункта перевалки на другом. В этом случае железнодорожный транспорт выполняет перевозки грузов на значительные расстояния, обслуживая территории, где водные коммуникации развиты недостаточно хорошо;
- подвоз грузов автотранспортом со складов отправителей и доставка на склады получателей: такие перевозки осуществляются на короткие расстояния, преимущественно в границах крупных населённых пунктов.

Взаимодействие работы различных видов транспорта базируется на выполнении перегрузочных операций по прямому варианту «автомобиль-судно», «вагон-судно» и обратно. Техничко-экономическая эффективность такой системы зависит от согласованности в работе железнодорожной станции, порта и автотранспортного предприятия, ритмичности поступления грузов, структуры и величины грузооборота в пункте перевалки [8].

Основы технологии взаимодействия порта, грузовой станции и автотранспортного предприятия заключаются в организации выполнения планов перевозок на базе так называемого единого технологического процесса [9, 10]. При этом эффективность взаимодействия различных видов транспорта в мультимодальных транспортных узлах определяется следующими факторами:

1. сокращение срока доставки грузов;
2. высвобождение оборотных средств грузовладельцев при уменьшении времени нахождения грузов на складах порта;
3. сокращение потребной ёмкости складов;
4. уменьшение штата работников и количества перегрузочных механизмов;
5. снижение простоев транспортных средств под грузовыми операциями;
6. снижение величины транспортных расходов [9].



На рис. 1 приведен алгоритм решения задачи оптимизации взаимодействия различных видов транспорта в производственно-транспортных процессах доставки НСМ, в котором реализуется концепция оптимальности поиска и принятия решений. Критерием оценки эффективности взаимодействия речного и наземных видов транспорта, может быть принят минимум текущих расходов по порту и флоту за время обработки флота в порту и её ожидания. Математическое выражение критерия эффективности – это функция цели, которая может быть записана в виде (1):

$$F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} \cdot X_{ij} \rightarrow \min ; X_{ij} \geq 0 ; F = \sum_{i=1}^m X_{ij} = \Pi_j ; \sum_{j=1}^n X_{ij} = a_i , \quad (1)$$

где  $\Pi_j$  – объем перевалки по  $j$ -му варианту, т;

$a_i$  – масса груза, доставляемого в порт  $i$ -м типом судна, т;

$C_{ij}$  – себестоимость перевалки груза с  $i$ -ого типа судна  $j$ -м способом.

Предлагаемый авторами критерий эффективности взаимодействия – минимум удельных сверхнормативных простоев подвижного состава (2):

$$F = \frac{\sum_{j=1}^m N_{cj} \cdot t_{сверхj}}{\sum_{j=1}^m G_{\phi.mj}} \rightarrow \min \quad (2)$$

где

$\sum_{j=1}^m N_{cj}$  – навигационный судопоток, необходимый для перевозки навигационного объема грузов  $j$ -го рода или общий, ед.;

$t_{сверхj}$  – величина сверхнормативного простоя транспортных средств, загруженных  $j$ -м родом груза, сут.;

$\sum_{j=1}^m G_{\phi.mj}$  – общая грузопереработка  $j$ -х грузов на причале (в порту в целом) за расчётный период, т.

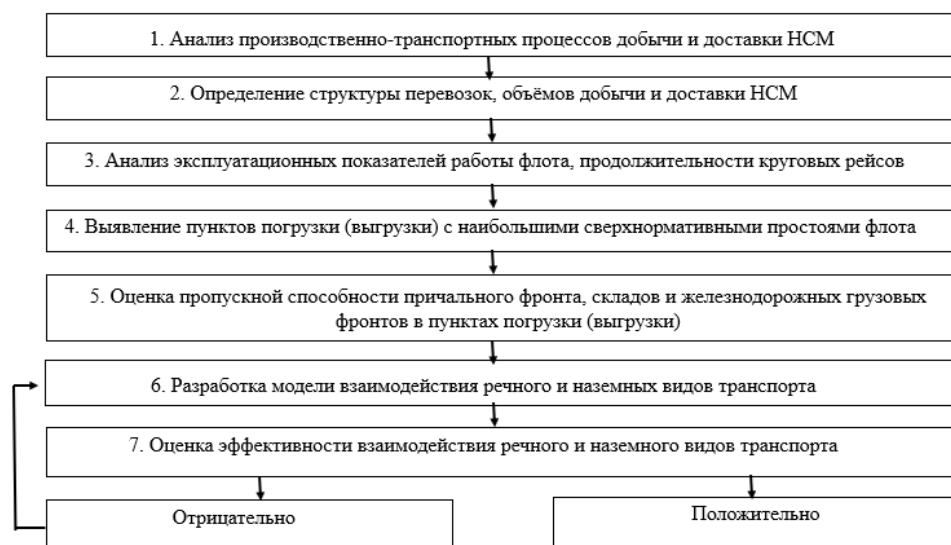


Рис. 1. Алгоритм решения задачи оптимизации взаимодействия различных видов транспорта в производственно-транспортных процессах доставки НСМ

### Результаты

В Обском бассейне добычу и перевозку НСМ осуществляют холдинг «Алтайские карьеры» (Бийский гравийно-песчаный и Малетинский каменный карьеры), АО «Новосибирское карьероуправление» (Новобибеевский карьер), АО «Томская судоходная компания» и другие. Примеры производственно-транспортных процессов добычи и доставки НСМ с месторождений, расположенных на участке Нижний подходной канал (НПК) – устье реки Томь показаны на рис. 2, с Верхнетомских месторождений, расположенных на р. Томь – на рис. 3.

Томская судоходная компания (ТСК) является одним из крупнейших производителей НСМ на рынке Сибирского федерального округа. Компания занимается оказанием услуг поставки ПГС, щебня, песка и других НСМ потребителям Новосибирской, Томской, Тюменской областей, Ханты-Мансийского и Ямало-Ненецкого автономных округов [11].

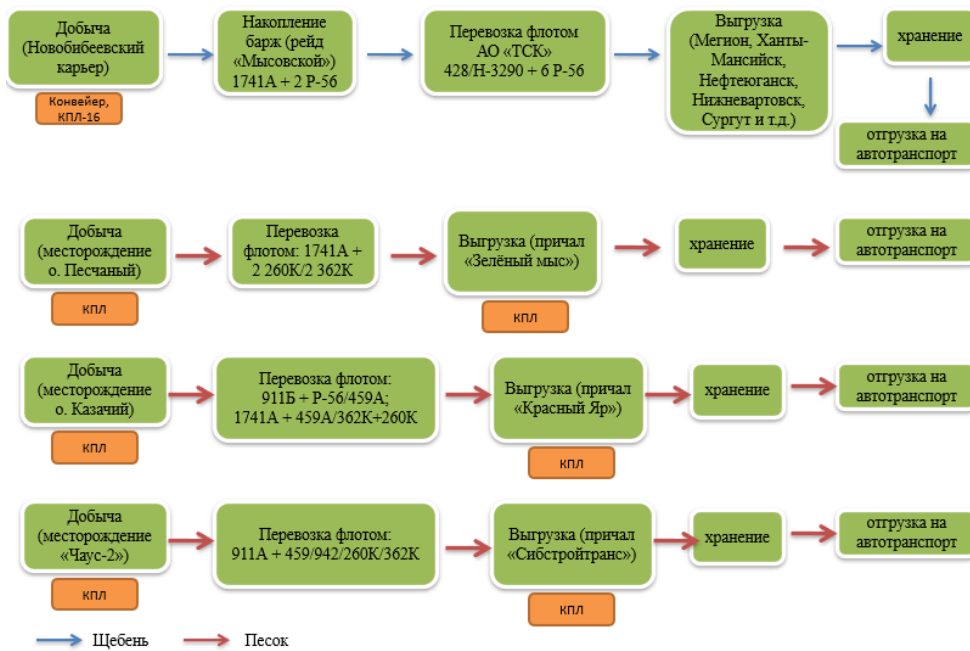


Рис. 2. Добыча и перевозка НСМ на участке р. Обь (Нижний подходной канал – у.р. Томь)

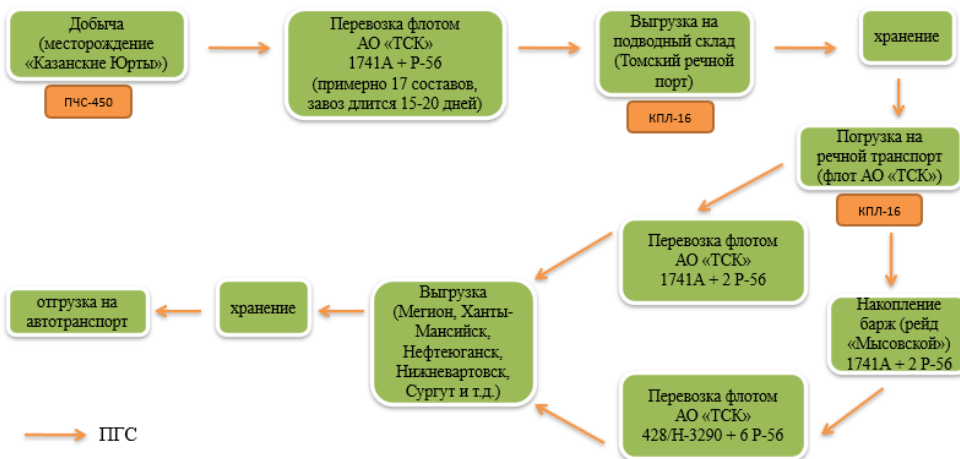


Рис. 3. Добыча и перевозка НСМ на р. Томь (фрагмент)

Показатели перевозочной деятельности компании в 2017–2021 гг. отражены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели перевозок АО «ТСК», тыс. т

Наименование груза	Период, гг.				
	2017	2018	2019	2020	2021
<b>Всего, в т.ч.</b>	3172,0	2925,9	3249,2	2795,5	2818,8
<b>Местные, в т.ч.</b>	519,6	521,4	729,3	547,3	488,3
<i>ПГС, ОПГС</i>	354,7	490,2	670,8	521,1	456,6
<i>Гравий</i>	98,0	0,0	36,0	16,1	15,0
<i>Песок</i>	34,2	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>Щебень фр. 5-20 мм</i>	32,7	31,2	22,5	10,1	16,7
<b>Транзит, в т.ч.</b>	2652,4	2404,5	2519,9	2248,2	2330,5
<i>Щебень, отсеб</i>	1826,3	1879,3	1880,6	1696,3	1994,2
<i>Шлак</i>	565,6	251,1	375,6	247,5	7,9
<i>ПГС, ОПГС, песок, гравий</i>	192,7	212,9	205,3	242,5	227,3
<i>ЖБИ</i>	36,6	22,6	21,4	22,1	0,9
<i>Круглый лес</i>	24,9	33,2	18,5	32,5	66,5
<i>Прочие грузы</i>	6,3	5,4	18,5	7,3	33,7

Анализ работы флота АО «ТСК» за 5 лет показал снижение объема перевозок на 11,1%, причём местные перевозки сократились на 6,0%, транзит – на 12,1%. В структуре местных перевозок НСМ произошли следующие изменения: выросли объёмы перевозок обогащённой ПГС, снизились объёмы перевозок гравия и речного щебня фракции 5–20 мм, а также песка. В структуре транзита наиболее существенные изменения произошли за счёт роста перевозок НСМ всех видов на 10,0%, круглого леса более чем в 2,6 раза, спада перевозок шлака и ЖБИ.

Исходя из значений эксплуатационных показателей работы флота, в том числе данных о продолжительности круговых рейсов (табл. 2), можно отметить, что в 2020 году в сравнении с 2019 годом продолжительность круговых рейсов и стоянок изменялась. Ранжируя значения продолжительности простоев флота в пунктах выгрузки, предлагаем распределить их на четыре группы:

- первая группа – пункты, где время стоянок и время кругового рейса сократилось;
- вторая группа – пункты, где сократилось время кругового рейса, но время стоянки увеличилось;
- третья группа – пункты, где произошло увеличение времени кругового рейса при сокращении времени стоянок;
- четвёртая группа – пункты, где произошло увеличение и времени кругового рейса, и времени стоянок.

Следует отметить, что в целом, по сравнению с 2019 годом, в навигацию 2020 года произошло значительное увеличение сверхнормативных простоев несамоходного флота – с 340 до 519 судов-суток.

Пункты с наибольшими простоями: Нижневартовск – 158 судов-суток, Солкино и Барсово (СНГ) – 66,5 судов-суток, Ханты-Мансийск – 19 судов-суток, Сургут – 38,5 судов-суток, Базьяны – 19 судов-суток. Анализ показал, что основной причиной сверхнормативных простоев является нехватка складских площадей и несогласованность работы флота и причалов клиентуры (например, в ряде пунктов клиент не принимал груз в выходные дни).

Для выявления наиболее «проблемных» пунктов выгрузки предлагается использовать показатель «величина удельного простоя судов из расчёта на 1000 тонн перевезенных грузов» (табл. 3). Так, критический уровень данного показателя отмечается в пункте Нижневартовск (0,47 судо-суток/1000 тонн), далее с отрывом почти в 2 раза следует пункт выгрузки Ханты-Мансийск (0,24 судо-суток/1000 тонн). Для пункта Нижневартовск авторами рассмотрена возможность снизить сверхнормативные простои транспортных средств путём организации ритмичного движения автотранспорта.

Таблица 2

**Продолжительность круговых рейсов и стоянок судов, сут.**

Пункты назначения	2019 год			2020 год		
	продолжи- тельность круговых рейсов	в т.ч. стоянка		продолжи- тельность круговых рейсов	в т.ч. стоянка	
		<i>max</i>	<i>ср.</i>		<i>max</i>	<i>ср.</i>
<b>1 группа</b>						
Каргасок	8,3	3	0,7	7,4	2,2	1,3
Катыльга	21,3	24,8	1,9	20	4,1	1,5
Мегион	16	3,5	3	14,3	0,8	0,5
Молчаново	2,1	2	0,8	1,9	1,1	0,6
Солкино	16,4	10,7	2,8	15,6	9,6	2,6
Ханты-Мансийск	22	6	2,8	18,6	3,3	1,5
<b>2 группа</b>						
Коломино	4,2	1,4	0,9	3,7	2,6	1,2
Могочино	3,2	0,8	0,4	2,6	1,1	1
<b>3 группа</b>						
Колтогорск	13,7	6,4	2,9	14,2	6,3	2,3
Кожевниково	3,5	2,6	2	3,9	1,7	1,2
Парабель	7,4	7,7	2,7	8,2	2,9	1,8
Сургут	15	13,6	2,7	15,2	10,6	2,4
<b>4 группа</b>						
Базьяны	24	1,9	1	24,2	7,9	4,3
Барсово	-	-	-	14,1	5,6	2,7
Медведево	14,3	0,3	0,3	14,4	1,5	0,8
Нижневартовск	12,9	3	1	13,7	6	1,3
Селиярово	17,2	4,7	2,4	17,2	2,9	1,6

Таблица 3

**Оценка эффективности доставки НСМ из Томска**

Наименование пункта назначения	Объем перевозок, т	Суммарные сверхнормативные простои, судо-суток	Удельный сверхнормативный простой, судо-суток/ 1000 т перевозок
Базьяны	145 139,00	30,5	0,21
Барсово	223 128,00	19,0	0,09
Нижневартовск	339 068,00	158,0	0,47
Новый Порт	102 124,80	12,6	0,12
Солкино	170 145,00	36,0	0,21
Сургут	263 059,50	38,5	0,15
Ханты-Мансийск	77 881,00	19,0	0,24

Авторами смоделирована возможность установления ритмичного прибытия судов таким образом, чтобы склад не переполнялся и не возникало ситуации, когда груз хранится «на плаву». Хранение груза «на плаву» – причина сверхнормативных простоев флота в пунктах Базьяны, Барсово, Нижневартовск, Сургут и др.

Для перевалки 347,2 тыс. т щебня через порт Нижневартовск была построена модель взаимодействия речного и автомобильного транспорта с интервалом прибытия составов (БТ 600 л.с. +2\*Н/х 2800 т) двое суток и вывозом груза из порта автомобильным транспортом (самосвал 20 т) с интервалом 15 мин. (рис. 4).

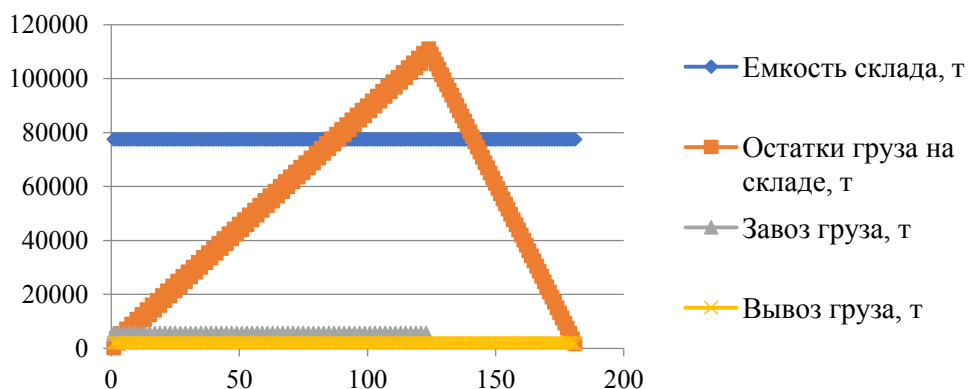


Рис. 4. Завоз, вывоз и накопление щебня на складе при несогласованной работе внутреннего водного и автомобильного транспорта

Согласно графику, представленному на рис. 4, на 86-е сутки работы порта как мультимодального транспортного узла произойдет переполнение складов на причалах 1–3, общей емкостью 77,4 тыс. т щебня.

Если осуществлять пропуски отправок, прибывающих на 85-е сутки, затем на 93-е сутки и далее каждые 6 суток осуществлять пропуск отправок (99, 105, 111, 117, 123 сут.), то период завоза увеличится с 123 до 143 сут., что позволяют многолетние среднегодовые сроки начала и окончания навигационного периода в пункте Нижневартовск. График завоза, вывоза и накопления щебня на складе при согласованной работе внутреннего водного и автомобильного транспорта приведен на рис. 5.

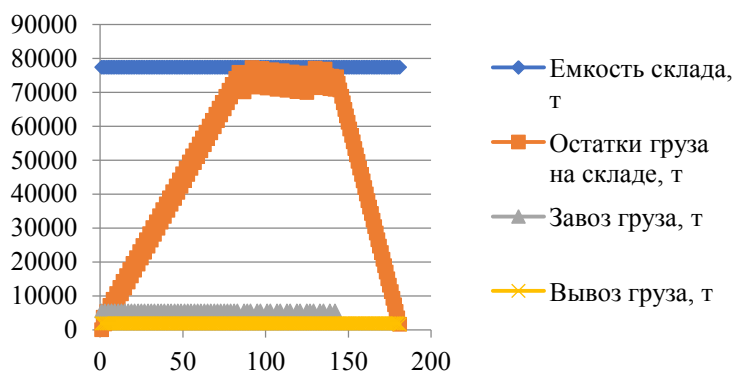


Рис. 5. Завоз, вывоз и накопление щебня на складе при согласованной работе внутреннего водного и автомобильного транспорта

### Заключение

В процессе доставки грузов речным транспортом согласование работы всех звеньев транспортного процесса – флота, перегрузочных фронтов, складов и наземных видов транспорта – имеет большое значение. Во многом эффективность такого согласования зависит от уровня технического и технологического оснащения перевалочных пунктов. Чем он ниже, тем сложнее качественно организовать взаимодействие различных видов транспорта, пропускную способность всех перегрузочных звеньев, распределение ресурсов.

В разработанном алгоритме решения задачи оптимизации взаимодействия различных видов транспорта в производственно-транспортных процессах доставки НСМ с участием речного транспорта реализуется концепция оптимальности поиска и принятия решений. На начальном этапе выполнен анализ производственно-транспортных процессов добычи и доставки НСМ: выявлены основные грузопотоки, характеристики флота и перегрузочной техники, определена структура перевозок, объемов добычи и доставки НСМ. На следующем этапе изучены эксплуатационные показатели работы флота, продолжительность круговых рейсов, выявлены пункты погрузки (выгрузки) с наибольшими сверхнормативными простоями флота, определена пропускная способность всех элементов портовой инфраструктуры. Практическое применение разработанной модели взаимодействия речного и наземных видов транспорта позволит организовать это взаимодействие, существенно улучшив показатели скорости, своевременности, предсказуемости, ритмичности транспортного процесса.

На заключительном этапе выполняется оценка эффективности системы взаимодействия речного и наземных видов транспорта. Для оценки эффективности систем и комплексов важен выбор показателя, который является мерой степени соответствия полученного результата запланированному. Основным требованием при этом является соответствие показателя целям функционирования системы.

Если полученный результат оценки отрицателен, то цикл расчётов повторяется, начиная с шестой позиции. Процедура разработки и принятия решения завершается при получении положительной оценки. Таким образом, реализуется концепция пригодности, согласно которой система признается эффективной.

**Список литературы**

1. Бунеев, В. М. Прогнозирование грузопотоков и их освоения при реализации транспортной стратегии в районах Крайнего Севера / В. М. Бунеев, В. А. Виниченко // Вестник НГИЭИ. – 2018. – № 4(83). – С. 115-123.
2. Рагулин, И. А. Технологические аспекты повышения качества нерудных строительных материалов при их поставке предприятиями речного транспорта / И. А. Рагулин, Д. А. Коршунов // Успехи современной науки. – 2017. – № 7. – С. 117-122.
3. Ничипорук, А. О. Современное состояние и направления исследования в области добычи и поставки нерудных стройматериалов в речном транспорте / А. О. Ничипорук // XI Прохоровские чтения посвященные 85-летию Волжского государственного университета водного транспорта: сборник статей участников Одиннадцатых Прохоровских чтений, Нижний Новгород, 23 декабря 2015 года. – Нижний Новгород: ФГБОУ ВО “ВГУВТ”, 2016. – С. 41-48.
4. Лисин, А. А. Логистические подходы к управлению поставкой нерудных строительных материалов в речных портах / А. А. Лисин // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2016. – № 46. – С. 15-20.
5. Обеспечение качества и эффективности перевозок сухих грузов речным транспортом в современных условиях / А. И. Телегин, А. О. Ничипорук, О. Л. Домнина [и др.]. – Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2020. – 132 с. – ISBN 978-5-901722-71-8.
6. Телегин, А. И. Разработка метода определения стандартных показателей своевременности выполнения грузовых речных перевозок / А. И. Телегин, А. О. Ничипорук, Н. В. Гончарова // Транспортное дело России. – 2020. – № 2. – С. 178-182.
7. Analysis of the Risks of the River Port and Consumers in the Production and Delivery of Non-metallic Construction Materials / E.S. Zhendareva, E.S. Kadnikova, V.N. Popov // Lecture Notes in Networks and Systems Vol. 403 LNNS, Pages 745 – 755 2022 International Scientific Siberian Transport Forum, TransSiberia 2021
8. Владимирская, И. П. Оптимизация взаимодействия видов транспорта / И. П. Владимирская // Мир транспорта. – 2009. – Т. 7. – № 4(28). – С. 16-19.
9. Боровская, Ю. С. Единый технологический процесс в согласованной работе речного порта и железнодорожной станции / Ю. С. Боровская, В. Ю. Зыкова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2016. – № 1-2. – С. 15-17.
10. Зачесов, А. В. Повышение эффективности работы флота на водных путях Крайнего Севера / А. В. Зачесов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2017. – № 3-4. – С. 8-11.
11. Кноль, В. А. Региональная логистическая система доставки нерудных строительных материалов / В. А. Кноль // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2018. – № 1. – С. 37-39.

**References**

1. Buneev, V. M. Forecasting of cargo flows and their development in the implementation of the transport strategy in the regions of the Far North / V. M. Buneev, V. A. Vinichenko // Bulletin of the NGIEI. – 2018. – № 4(83). – Pp. 115-123.
2. Ragulin, I. A. Technological aspects of improving the quality of non-metallic building materials when they are supplied by river transport enterprises / I. A. Ragulin, D. A. Korshunov // Successes of modern science. – 2017. – No. 7. – Pp. 117-122.
3. Nichiporuk, A. O. The current state and directions of research in the field of extraction and supply of non-metallic building materials in river transport / A. O. Nichiporuk // XI Prokhorov readings dedicated to the 85th anniversary of the Volga State University of Water Transport: a collection of articles by participants of the Eleventh Prokhorov readings, Nizhny Novgorod, December 23, 2015. – Nizhny Novgorod: FGBOU VO “VGUVT”, 2016. – Pp. 41-48.
4. Lisin, A. A. Logistic approaches to managing the supply of non-metallic building materials in river ports / A. A. Lisin // Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport. - 2016. – No. 46. – Pp. 15-20.



5. Ensuring the quality and efficiency of dry cargo transportation by river transport in modern conditions / A. I. Telegin, A. O. Nichiporuk, O. L. Domnina [et al.]. – Nizhny Novgorod : Volga State University of Water Transport, 2020. – 132 p. – ISBN 978-5-901722-71-8.
6. Telegin, A. I. Development of a method for determining standard indicators of the timeliness of cargo river transportation / A. I. Telegin, A. O. Nichiporuk, N. V. Goncharova // Transport business of Russia. – 2020. – No. 2. – Pp. 178-182.
7. Analysis of the Risks of the River Port and Consumers in the Production and Delivery of Non-metallic Construction Materials / E.S. Zhendareva, E.S. Kadnikova, V.N. Popov // Lecture Notes in Networks and Systems Vol. 403 LNNS, Pages 745 – 755 2022 International Scientific Siberian Transport Forum, TransSiberia 2021
8. Vladimirskaia, I. P. Optimization of interaction of modes of transport / I. P. Vladimirskaia // The world of transport. - 2009. – T. 7. – № 4(28). – Pp. 16-19.
9. Borovskaya, Yu. S. Unified technological process in the coordinated work of a river port and a railway station / Yu. S. Borovskaya, V. Yu. Zykova // Scientific problems of transport in Siberia and the Far East. – 2016. – No. 1-2. – Pp. 15-17.
10. Zachesov, A.V. Improving the efficiency of the fleet on the waterways of the Far North / A.V. Zachesov // Scientific problems of transport in Siberia and the Far East. – 2017. – No. 3-4. – Pp. 8-11.
11. Knol, V. A. Regional logistics system for the delivery of non-metallic building materials / V. A. Knol // Scientific problems of transport in Siberia and the Far East. – 2018. – No. 1. – Pp. 37-39.

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

**Жендарева Елена Сергеевна**, к.э.н., доцент, заведующий кафедрой управления работой портов, Сибирский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «СГУВТ»), 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, д.33, e-mail: gendareva@yandex.ru

**Elena S. Zhendareva**, PhD in Economy Science, Associate Professor, Head of the Port Management Chair, Siberian State University of Water Transport, 33, Shchetinkina st., Novosibirsk, 630099, e-mail: gendareva@yandex.ru

**Кадникова Елена Сергеевна**, старший преподаватель, аспирант, Сибирский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «СГУВТ»), 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, д.33, e-mail: kadnikova.e@mail.ru

**Elena S. Kadnikova**, senior lecturer, postgraduate of Port Management Chair, Siberian State University of Water Transport, 33, Shchetinkina st., Novosibirsk, 630099, e-mail: kadnikova.e@mail.ru

**Гюнтер Алексей Викторович**, старший преподаватель, аспирант, Сибирский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «СГУВТ»), 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, д.33, e-mail: nepolo\_2010@mail.ru

**Alexey V. Giunter**, senior lecturer, postgraduate of Port Management Chair, Siberian State University of Water Transport, 33, Shchetinkina st., Novosibirsk, 630099, e-mail: nepolo\_2010@mail.ru

Статья поступила в редакцию 05.05.2022; опубликована онлайн 07.06.2022.  
Received 05.05.2022; published online 07.06.2022.

УДК 338.242.2

DOI: 10.37890/jwt.vi71.253

## **Проблемы эффективного функционирования Единой глубоководной системы европейской части России**

**В.И. Минеев<sup>1</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5079-7922>

**О.В. Почекаева<sup>1</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0400-0756>

**В.М. Иванов<sup>1</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0195-934X>

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

**Аннотация.** Уникальное географическое положение европейской части России, определяющее ее транзитный потенциал, представляет значительные возможности для эффективного развития транспортного комплекса, поскольку именно здесь находится своеобразный международный транспортный перекресток двух коридоров: «Восток-Запад» и «Север –Юг». Для внутреннего водного транспорта наибольший интерес представляет международный транспортный коридор (МТК) «Север-Юг», по которому осуществляется торговля между странами Европы и Ираном, Пакистаном, Ираком. Кроме того, прогнозируется привлечение грузопотоков из стран Ближнего Востока и Индии. При этом объем торговли между странами в рамках коридора «Север-Юг» в 2019 году достиг более 200 тыс. в двадцатифутовом эквиваленте (ДФЭ). По прогнозам на 2035 год он может вырасти до 400 тыс. ДФЭ. Часть грузопотока может идти через Россию транзитом из Каспия в Европу в судах «река-море» плавания. Вместе с тем современное состояние ключевой артерии Европейской части России – реки Волги не обеспечивает регулярное движение вследствие недостаточности глубин судового хода, что оказывает негативное влияние на экономику перевозок и конкурентоспособность внутреннего водного транспорта. В результате традиционные для речного транспорта грузопотоки уходят на автомобильный и железнодорожный транспорт. При этом исследования последних лет свидетельствуют о том, что авто и железнодорожные магистрали, расположенные параллельно внутренним водным путям перегружены. В результате имеем увеличение выбросов вредных газов в атмосферу, увеличение доли логистических затрат в себестоимости перевозок, увеличение затрат на содержание и ремонт дорог.

**Ключевые слова:** Единая глубоководная система (ЕГС) России, международные транспортные коридоры, внешнеторговые бесперевалочные перевозки водным транспортом, их эффективность, конкурентоспособность.

## **Problems of effective functioning of the Unified deep-water system of the European part of Russia**

**Valery I. Mineev<sup>1</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5079-7922>

**Olga V. Pochekaeva<sup>1</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0400-0756>

**Valery M. Ivanov<sup>1</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0195-934X>

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

**Abstract.** The unique geographic location of the European part of Russia, which determines its transit potential, presents significant opportunities for the effective development of the transport complex, since a kind of international transport crossroads of two corridors: "East-West" and "North-South" is located here. For inland water transport, the North-South International Transport Corridor (ITC) is of the greatest interest, through which trade is carried out between European countries and Iran, Pakistan, Iraq. In addition, it is predicted to attract cargo flows from the countries of the Middle East and India. At the same time, the volume of trade between countries within the North-South corridor in 2019 reached more than 200 thousand in twenty-foot equivalent unit (TEU). According to forecasts for 2035, it can grow to 400,000 TEU. Part of the cargo traffic can go through Russia in transit from the Caspian Sea to Europe in river-sea vessels. At the same time, the current state of the key artery of the European part of Russia - the Volga River does not provide regular movement due to the lack of depths of the ship's passage, which has a negative impact on the economy of transportation and the competitiveness of inland water transport. As a result, the cargo flows traditional for river transport go to road and rail transport. At the same time, studies of recent years indicate that auto and railway lines located parallel to inland waterways are overloaded. As a result, we have an increase in emissions of harmful gases into the atmosphere, an increase in the share of logistics costs in the cost of transportation, and an increase in the cost of maintaining and repairing roads.

**Keywords:** Unified Deep-Water System (USS) of Russia, international transport corridors, foreign trade non-transshipment transportation by water transport, their efficiency, competitiveness.

#### **Введение**

В 1931 году был разработан проект по улучшению судоходных условий на р. Волга, получивший название «Большая Волга». В соответствии с проектом планировалось создать водный путь, по которому суда большой грузоподъемности могли бы свободно плавать между Каспийским, Черным, Балтийским и Белом морями. Для этого необходимо было построить 10 гидроузлов. Несмотря на вносимые в дальнейшем изменения в проект одним из базовых считался Чебоксарский гидроузел.

Проектирование Чебоксарского гидроузла началось в 1960 году, в 1967 началось строительство, в ноябре 1980 завершилось перекрытие Волги. В результате в 1981 году было обеспечено поднятие здесь уровня воды до отметки в 63 метра (относительно уровня Балтийского моря). На 1987 годы было запланировано поднятие уровня воды до отметки в 68 метров. Однако зоны затопления в Нижегородской области и Республике Мари-Эл подготовлены не были из-за недофинансирования. Проект был приостановлен в 1989 году. В итоге создание Единой глубоководной системы, обеспечивающей проход по р. Волга из Каспийского и Черного морей к Балтийскому и Белому морям оказался не завершен. В результате этого образовался участок в 54 километра от Городца до Н. Новгорода с малыми глубинами.

С тех пор проблема улучшения судоходных условий в нижнем бьефе Городецкого гидроузла на каком только уровне государственной власти ни рассматривалась специалистами. Предлагались различные варианты решений, в том числе увеличение шероховатости русла путем отсыпки на дно реки каменного материала, создание стеснительных сооружений для поднятия уровня воды, строительство третьей ступени Городецкого шлюза, строительство низконапорного транспортного гидроузла.

### **Методология**

В современных условиях устойчивое развитие как отдельных стран, так и регионов в значительной степени определяется эффективностью транспортной деятельности [1]. Целью исследования в настоящей статье является выявление проблем и возможностей развития европейской части транспортной системы России с использованием речного транспорта как устойчивой альтернативы прочим элементам транспортного комплекса.

Как известно, страны Европейского союза обратили внимание на то, что многие товары, перевозимые по автомагистралям, можно перемещать по железной дороге и по рекам, что в значительной степени способствует реализации положений «зеленой экономики». В странах с развитой водной транспортной инфраструктурой давно пришли к выводу о том, что водный транспорт является наиболее энергоэффективным средством передвижения, поскольку расход дизельного топлива здесь на каждые 100 тонно-километров меньше, чем для других видов транспорта - железнодорожного или автомобильного [2].

Основными видами на водном транспорте являются перевозки навалочных, генеральных, наливных грузов, в том числе контейнеры [3]. При этом современной тенденцией является то, что европейский сектор грузовых перевозок внутри страны нацелился на сдвиг к мультимодальным перевозкам с использованием железнодорожного, внутреннего водного и морского транспорта в целях снижения нагрузки автомобильные коммуникации [4,5].

В Европе огромные суммы денег вкладываются в строительство новой транспортной инфраструктуры и поддержание существующей. При этом считается важным осведомленность о факторах, ведущих к успеху инфраструктурных проектов [6].

В управлении проектами одной из основных целей проекта является «стоимость». Она используется в качестве показателя успеха. Сочетание следующих факторов объясняет стоимость проектов:

- высокий уровень возможности экономить затраты в проекте, благодаря способности строить, вводить новшества в условиях оптимального распределения строительных рисков;
- хорошая институциональная среда в стране, для которой разрабатывается проект, что означает наличие хорошей нормативной базы, политической поддержки и эффективность правительства;
- высокая способность покрывать расходы за счет доходов, полученных в результате реализации проектов;
- допустимый риск проектов вследствие привлекательности схем их финансирования с позиции эффективности использования транспортной инфраструктуры;
- заключение контрактов с хорошими договорными соглашениями.

В качестве ключевого направления развития транспортной инфраструктуры в Европе принято решение о повышении уровня межвидовой транспортной конкуренции в целях создания рынка транспортных услуг, ориентированного на потребителя [7]. Одной из причин такого подхода явилось то, что за последние десятилетия объем грузовых перевозок в Европе значительно увеличился и этот рост был преимущественно поглощен автомобильным транспортом [8]. Однако помимо множества преимуществ автомобильные перевозки вызывают заторы, аварии, загрязнение воздуха и шум. Очевидно, что в современных условиях нужны

альтернативы автомобильным перевозкам с позиции указанных недостатков. В этом смысле именно внутренний водный транспорт при решении имеющихся проблем способен повысить качественные характеристики транспортного комплекса.

При проведении исследований были использованы методы сравнительного анализа и типологии.

### Результаты

Режим судоходства, сложившийся на сегодняшний день на участке реки Волга от Городца до Н. Новгорода, препятствует беспереvalочной доставке внешнеторговых грузов в судах смешанного «река-море» плавания по МТК «Север-Юг» от причалов Ирана до пунктов Западных стран Балтийского моря. Обеспеченность проходных осадок 3,1 м и более на городецких шлюзах № 15 и № 16 в навигацию 2014г., по данным Федерального агентства морского и речного транспорта РФ, составила всего 3.5% продолжительности периода навигации (рис.1). Поэтому в период «низкой воды» для обеспечения прохода здесь судов с осадкой 3,0 м на относительно короткий период времени суток (от 2 до 6 ч) организуются специальные пуски воды через Городецкий гидроузел, используя водные ресурсы Рыбинского и Горьковского водохранилищ. Однако уже суда с осадкой 3,6 м и более в периоды отсутствия пополнения водных ресурсов из указанных выше водохранилищ вынуждены либо простаивать в ожидании достаточных для безопасного судоходства глубин водного пути, либо продолжать движение с неполной загрузкой.



Рис. 1. Почасовая обеспеченность проходных осадок (составлено авторами с использованием [9])

Примерами маловодных навигаций являются 1972, 2006, 2014, 2015 годы, когда в результате ограничения по осадке судов до 3,0 м в течение длительного межлетнего периода практически было сорвано сквозное судоходство судов большой грузоподъемности по р. Волге. Не лишне напомнить, что именно на рассматриваемом участке водного пути она относится к трассе международного значения.

По итогам Госсовета в августе 2016 года из всех вариантов решения данной проблемы был выбран вариант строительства низконапорной плотины в районе г.

Балахны. В дальнейшем границы низконапорной плотины были сдвинуты к границе Сормовского района Нижнего Новгорода. Проект включили в государственную программу «Развитие транспортной системы».

Однако против данного проекта выступили экологи и администрация г. Балахны. Поэтому появилась новая идея – не строить низконапорную плотину, а приступить к строительству дополнительного шлюза в составе Городецкого гидроузла. Одновременно предлагалось проведение дноуглубительных работ на участке от Городца до Нижнего Новгорода длиной 40 км.

Но опять нашлись те, кого новый вариант решения проблемы судоходства на реке Волга не полностью устраивает, поэтому в МТК «Север-Юг» продолжается использование не водного транспорта, а таких наземных видов как железнодорожный и автомобильный виды транспорта. В итоге - потери провозной способности большегрузных судов. В 2014 году общая сумма таких потерь по сравнению с 2005 годом выросла в 3,6 раза, а общая сумма потерь провозной способности большегрузного флота из-за ограничения осадки на участке Городец - Нижний Новгород за период 2005-2015 годы составила 17420 тыс. тонн.

Каковы перспективы освоения «выпадающих» грузопотоков внутреннего водного транспорта вследствие дальнейшего ухудшения путевых условий на участке Городец – Нижний Новгород наземными видами транспорта? По данным Росстата протяженность автомобильных дорог общего пользования федерального значения, соответствующих нормативным требованиям к транспортно-эксплуатационным показателям, в 2020 г. составила 47,5 тыс. км (83,8% от общей протяженности федеральной дорожной сети). При этом ситуацию по федеральным округам отражает рис. 2.

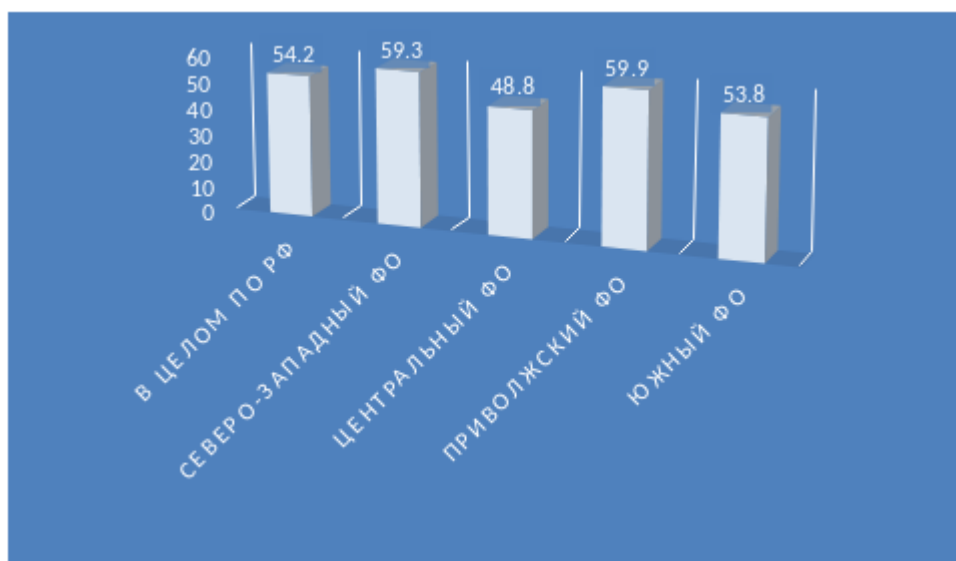


Рис. 2. Доля дорог общего пользования, не отвечающих нормативным требованиям, % (Источник: Росстат РФ [9])

Из рис.2 видно, что наихудшая ситуация сложилась в Северо-Западном и Приволжском федеральных округах. Именно здесь, где фактически и происходит перевозка грузов, которые можно было бы перевозить водным транспортом в рамках МТК «Север-Юг», доля автомобильных дорог, не соответствующих существующим

нормативам, составляет около 60%. Необходимо отметить, что несмотря на увеличение протяженности автомобильных дорог общего пользования федерального значения за период 2010-2020 гг. на 20,3% с 50,2 тыс. км до 60,4 тыс. км рост численности парка автотранспортных средств в 1,3 раза, увеличение объемов перевозок грузов и пассажиров на автомобильном транспорте привели к увеличению нагрузки на дорожную сеть и исчерпанию пропускной способности наиболее загруженных направлений.

Протяженность железнодорожных путей общего пользования за последние десять лет в пяти федеральных округах, отмеченных выше, практически не изменилась и составила в 2020 году 52,3 тыс. км. Увеличение объема перевозок при высокой плотности железнодорожных путей на 10000 км<sup>2</sup> (рис.3) привело к увеличению нагрузки на железнодорожную инфраструктуру, росту ее износа и исчерпанию пропускной способности наиболее загруженных направлений железных дорог. Доля протяженности линий железнодорожного транспорта общего пользования, имеющих ограничения пропускной способности, в общей протяженности линий железнодорожного транспорта общего пользования составляет сегодня около 9%.

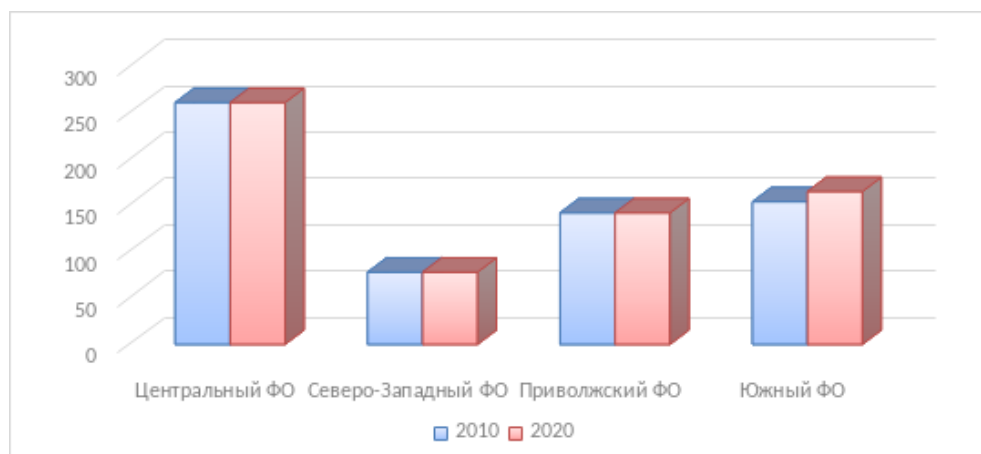


Рис. 3. Плотность железнодорожных путей по округам, км/10000 км<sup>2</sup>  
(составлено авторами с использованием [9])

При этом, как отмечается в [10,11], относительные затраты энергии на 1 ткм перевозок, если железнодорожные перевозки принять за 1, то на автомобильных перевозках это цифра находится в диапазоне 8-10; а на внутреннем водном транспорте - 0,2-0,8.

На данный момент максимально быстро решить вопрос обеспечения гарантированных глубин на водных путях МТК «Север-Юг» возможно путем наполнения Чебоксарского водохранилища до проектной отметки. Все остальные варианты решения данного вопроса носят проблематичный характер, вызывая правомерные дискуссии общественности [12].

Как показывает мировая практика, проблемы с наполнением водохранилищ до проектного уровня уже имели место. В частности, аргентинско-парагвайская ГЭС Ясирета на реке Парана работала долгое время на промежуточном уровне. Экономические и организационные споры о функционировании ГЭС в Аргентине и Парагвае продолжались 17 лет. И в конце концов в 2011 году пришли к первоначальному решению - заполнить водохранилище до проектной отметки и

вывести эту ГЭС на проектную мощность. При этом достроили систему инженерной защиты, переселили жителей в лучшие условия. В нашем случае вопрос остается нерешенным уже более 30 лет, и конца пока не видно.

Анализ результатов общественных слушаний по вопросу наполнения Чебоксарского водохранилища свидетельствует о том, что отказ регионов от заполнения носит чисто прагматический характер с тем, чтобы получить дополнительные федеральные средства для решения своих проблем.

Сложившаяся ситуация привела к тому, что деньги, вложенные в берегоукрепительные сооружения, оказались выброшенными на ветер. Но проблема не только в этом. Отказ от заполнения водохранилища до проектной отметки привел к тому, что среднегодовая рабочая мощность Чебоксарской ГЭС достигает лишь 450 МВт при выработке 2,2 млрд. кВт/час, что составляет от проектной мощности лишь немногим более 30%, а от проектной выработки немногим более 60%. На данную проблему неоднократно указывали энергетики, для которых поступление дополнительных 950 МВт в энергосистемы Средней Волги, Центра и Урала является абсолютно не лишним с учетом роста потребности в энергоресурсах как в стране, так и в мире. Можно напомнить также, что речь не идет о дополнительных капитальных затратах, а просто о выходе Чебоксарской ГЭС на проектный уровень.

Однако главной проблемой подъема уровня водохранилища до отметки 68 метров оппоненты считают необходимость переселения населения из зоны затопления и подтопления водохранилища. При этом необходимо иметь в виду, что из зоны затопления и подтопления к 1985 году не успели переселить лишь жителей 72 частных домов. Остальные были отселены, но в этих зонах появилось новых 2390 строений, хотя официально никакая хозяйственная деятельность там до сих пор не разрешена.

Опасения о том, что заполнение водохранилища до 68 м. будет катастрофическим для заречной части Нижнего Новгорода несколько завышены. Не секрет, что во время половодья уровень воды регулярно поднимается до отметки 70 м, о чем свидетельствует график на рис. 4.

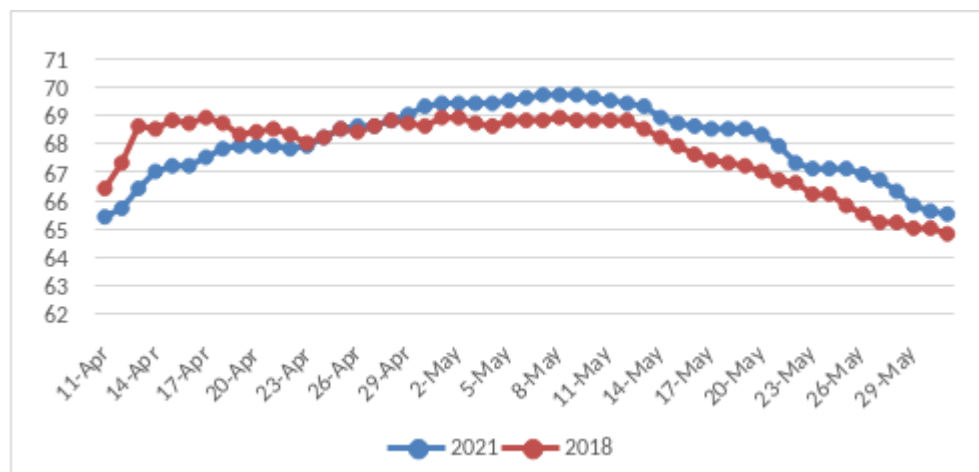


Рис. 4. Уровень воды в р. Волге у Н. Новгорода (Источник: данные ФБУ «Администрация Волжского бассейна внутренних водных путей» и Росгидромета ФГБУ «Приволжское УГМС»)

В современных условиях важным фактором конкурентоспособности является показатель энергоёмкости транспортной работы [2]. На водном транспорте снижение энергоёмкости перевозок напрямую связано с увеличением грузоподъемности судов.



Последнее, как правило, связано с осадкой флота, которая в свою очередь зависит от гарантированных глубин судового хода. Поэтому на реках мира строятся гидросооружения. Пример могут являться реки стран Европы, США, Китая, Индии.

При гарантированной осадке 3,6 м. суда типа «Волга-Дон», «Волганефть», танкеры проекта RST 25 берут на борт 5 тыс. тонн груза. Снижение осадки до 3,0 м. позволяет взять груза на 1000 тонн меньше, а при осадке 2,5 м. рентабельность перевозок в этих судах близка к нулю.

Исследования, выполненные Государственным университетом морского и речного флота им. Адмирала Макарова, свидетельствуют о том, что грузопоток через Городецкий гидроузел из-за недостаточных глубин упал по сравнению с 2005 годом вдвое и составил всего 5 млн. тонн. Только 4% из грузопотоков в 558 млн. тонн, тяготеющих к Единой глубоководной системе (ЕГС) европейской части, проходят по внутренним водным путям. Решение проблемы малых глубин может способствовать переключению порядка 60 млн. тонн грузов на внутренний водный транспорт. Грузопоток же через Городецкий гидроузел может к 2030 году достичь 21,5 млн. тонн.

Пока решается вопрос о ликвидации лимитирующего участка, судоходные компании продолжают нести убытки вследствие того, что суда недогружаются в среднем на 35%. Экономические потери вынуждают судоходные компании сокращать перевозки через данный участок. Кроме того, новый флот заказывался компаниями с учетом гарантированной глубины на этом участке 3,6 м. Дальше тянуть с заполнением Чебоксарского водохранилища до проектной отметки нельзя, поскольку будущего у речного флота на р. Волге может и не быть.

### **Заключение**

Значительная часть внутренних водных путей в разных странах мира включает систему шлюзов и гидроэлектростанций. Например, в системе Рейн-Майн-Дунай 57 гидроэлектростанций. Советский Союз также осуществлял реконструкцию своих рек [13]. В Волжско-Камском бассейне построен каскад крупных водохранилищ с гидроэлектростанциями, как основа Единой глубоководной системы европейской части РФ, связывающий Европейские государства с государствами Юго-Восточной Азии и Африки.

Однако ситуация на главной водной магистрали Европы – реке Волга далека от идеальной вследствие лимитирующего участка в районе Городца. Развязка этого участка создаст условия для организации бесперевалочных перевозок экспортно-импортных грузов в МТК «Север-Юг» в судах смешанного «река-море» плавания. В современных условиях наиболее быстрореализуемым вариантом решения данной проблемы является наполнение Чебоксарского водохранилища до проектного уровня. Это позволит не только завершить первый этап создания воднотранспортной системы в Европейской части страны с гарантированной глубиной водного пути от 3,6 м и более, но и получить дополнительной электроэнергии на десятки млрд. руб. в год. Гарантированные глубины водного пути позволят эффективно использовать флот, уже имеющийся у судоходных компаний, а также строить новые суда, в том числе смешанного «река-море» плавания нового поколения. Как итог - создание сотен тысяч рабочих мест как на водном транспорте, так и в сопряженных с ним и сопутствующих отраслях промышленности [14.15].

В соответствии с Европейским соглашением о важнейших внутренних водных путях международного значения от 19 января 1996 г. (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 21 июля 2000 г. № 547) ЕГС отнесена к важнейшим водным магистралям международного значения. Сегодня ставится вопрос

о ее эффективной интеграции в международную транспортную систему посредством международных транспортных коридоров. Вопросы повышения темпов включения отечественного транспортного комплекса в систему международных связей и как следствие рост экспорта транспортных услуг обозначен в стратегических документах по развитию транспорта России, включая водный.

Следует заметить, что в конечном итоге в полном заполнении Чебоксарской ГЭС заинтересованы 39 регионов России, где производится почти половина всей промышленной и сельскохозяйственной продукции страны.

С наполнением Чебоксарского водохранилища до проектной отметки 68 метров грузоподъемность грузовых судов возрастет до 8000-9000 т, то есть на 30%-40%, а при организации перевозок в комбинированных составных грузовых теплоходах грузоподъемность их достигнет 12000-16000 т., следовательно, себестоимость перевозок в них будет существенно ниже. Использование таких грузовых судов смешанного «река-море» плавания позволит организовать бесперевалочные перевозки экспортно-импортных грузов, разгрузив частично перегруженные морские порты, исключить затраты на перевалку международных грузов в иностранных портах (Украины и Прибалтики), что существенно повысит конкурентоспособность российских экспортных перевозок, а также ускорит доставку грузов.

Следует отметить, что с увеличением грузоподъемности транспортных средств возрастет и пропускная способность шлюзов, грузовых причалов и т.д.

С подъемом воды в Чебоксарском водохранилище до проектной отметки 68 метров многие притоки Волги: р. Ветлуга, р. Сура и др. будут судоходными на значительной протяженности. Кроме того, наполнение водохранилища позволит получить мультипликативный эффект за счет таких позиций, как улучшение водорегулирования всего Волжско-Камского каскада гидроузлов, регулирования стока Волжского бассейна в интересах сельского хозяйства, снижение последствий паводковых процессов, дополнительное обеспечение электроэнергией районов Центра и Поволжья.

Заполнение Чебоксарского водохранилища до проектной отметки позволит комплексно решить возникшие проблемы как в судоходстве, так и в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства приволжского региона. Выгода, которую может получить страна в целом и Поволжье в частности от заполнения Чебоксарского водохранилища, без сомнения, превзойдет все затраты, связанные с решением этой проблемы.

#### Список литературы

1. Vilarinho A., Bartocci Liboni L., Siegler J. Challenges and opportunities for the development of river logistics as a sustainable alternative: a systematic review // *Transportation Research Procedia*, Volume 39, 2019, pp. 576-586.
2. Gołębiowski C. Inland Water Transport in Poland // *Transportation Research Procedia*, Volume 14, 2016, pp. 223-232.
3. Dávid A., Madudová E. The Danube river and its importance on the Danube countries in cargo transport // *Transportation Research Procedia*, Volume 40, 2019, pp.1010-1016.
4. He Z., Navneet K., van Dam W., Mieghem P.V. Robustness assessment of multimodal freight transport networks // *Reliability Engineering & System Safety* Volume 207, 2021, 107315
5. Wiśnicki, B. Determinants of River Ports Development Into Logistics Trimodal Nodes, Illustrated by the Ports of the Lower Vistula River/ B. Wiśnicki// *Transportation Research Procedia*. Volume 16. -2016.-p. 576-586.
6. Moschouli, E. Factors affecting the cost performance of transport infrastructure projects/ E.Moschouli, R.M.Socipto, T.Vanelslander, K.Verhoest// *European Journal of Transport and Infrastructure Research (EJTIR)*. Issue 18(4).- 2018.- p. 535-554.

7. Purwanto, A.J., Impact of Transport Infrastructure on International Competitiveness of Europe / A.J. Purwanto, C. Heyndrickx, J. Kiel, O. Betancor, M. P. Socorro, A. Hernandez, J.L. Eugenio-Martin, B. Pawlowska, P. Borkowski, R. Fiedler //World Conference on Transport Research - WCTR 2016 Shanghai. 10-15 July 2016 Impact of Transport Infrastructure on International Competitiveness of Europe //Transportation Research Procedia 8 June 2017 Volume 25 (Cover date: 2017) p. 2877-2888.
8. 8.Wiegmans B., Konings R. Intermodal Inland Waterway Transport: Modelling Conditions Influencing Its Cost Competitiveness // The Asian Journal of Shipping and Logistics June 2015 Volume 31, Issue 2 p.273-294.
9. 9.Транспорт в России. 2020: Стат.сб./Росстат. – Т65 М., 2020. – 108 с.
10. 10.Беляков А.А. Несколько слов о речном флоте и водных путях сообщения России. Заметки на полях статьи А. Мирановского «Деградацию речного флота РФ не остановить?» (<http://www.pravda.ru/economics/prognoses/10-08-2013/1169407-flot-0/>)
11. 11.Беляков, А.А. Транспортно-энергетический комплекс: тенденции функционирования и проблемы оптимизации / А. Беляков // Экономист – 2013. - №4 – С. 42-49.
12. 12.Кривошей В.А. Оздоровление речного транспорта невозможно без ясного понимания природы его системных проблем /В.А. Кривошей//Транспортное дело – 2017. - №5 – С. 11-14.
13. 13.Белая книга по эффективному и устойчивому внутреннему водному транспорту в Европе. Европейская экономическая комиссия, комитет по внутреннему водному транспорту// ООН – Нью-Йорк, Женева. – 2011. – С.76
14. 14.Веселов, Г.В. Проблемы и направления формирования конкурентоспособных форм и способов организации перевозок на водном транспорте / Г.В. Веселов, С.В. Костров // Вестник СамГУПС. – 2012. - №2 – С.31-36
15. 15.Минеев, В.И. Обоснование эффективности комбинированных технологий перевозок грузов водным транспортом / В.И. Минеев, С.В. Костров // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2013. - №1. – С.3-5.

#### References

1. 1.Vilarinho A., Bartocci Liboni L., Siegler J. Challenges and opportunities for the development of river logistics as a sustainable alternative: a systematic review // Transportation Research Procedia, Volume 39, 2019, pp. 576-586.
2. 2.Gołębiowski C. Inland Water Transport in Poland // Transportation Research Procedia, Volume 14, 2016, pp. 223-232.
3. 3.Dávid A., Madudová E. The Danube river and its importance on the Danube countries in cargo transport //Transportation Research Procedia, Volume 40, 2019, pp.1010-1016.
4. 4.He Z., Navneet K., van Dam W., Mieghem P.V. Robustness assessment of multimodal freight transport networks //Reliability Engineering & System Safety Volume 207, 2021, 107315
5. 5.Wiśnicki, B. Determinants of River Ports Development Into Logistics Trimodal Nodes, Illustrated by the Ports of the Lower Vistula River/ B.Wiśnicki//Transportation Research Procedia. Volume 16. -2016.-p. 576-586.
6. 6.Moschouli, E. Factors affecting the cost performance of transport infrastructure projects/ E.Moschouli, R.M.Soecipto, T.Vanelslander, K.Verhoest// European Journal of Transport and Infrastructure Research (EJTIR). Issue 18(4).- 2018.- p. 535-554.
7. Purwanto, A.J., Impact of Transport Infrastructure on International Competitiveness of Europe / A.J. Purwanto, C. Heyndrickx, J. Kiel, O. Betancor, M. P. Socorro, A. Hernandez, J.L. Eugenio-Martin, B. Pawlowska, P. Borkowski, R. Fiedler //World Conference on Transport Research - WCTR 2016 Shanghai. 10-15 July 2016 Impact of Transport Infrastructure on International Competitiveness of Europe //Transportation Research Procedia 8 June 2017 Volume 25 (Cover date: 2017) p. 2877-2888.
8. 8.Wiegmans B., Konings R. Intermodal Inland Waterway Transport: Modelling Conditions Influencing Its Cost Competitiveness // The Asian Journal of Shipping and Logistics June 2015 Volume 31, Issue 2 p.273-294.
9. 9.Transport in Russia. 2020: Stat.sb./Rosstat. - Т65 М., 2020. - 108 p.

10. Belyakov A.A. A few words about the river fleet and waterways of communication in Russia. Notes on the margins of the article by A. Miranovsky "Can't Stop the Degradation of the River Fleet of the Russian Federation?" (<http://www.pravda.ru/economics/prognoses/10-08-2013/1169407-flot-0/>).
11. Belyakov, A.A. Transport and energy complex: functioning trends and optimization problems / A. Belyakov // The Economist - 2013. - No. 4 - P. 42-49.
12. Krivoshey V.A. The improvement of river transport is impossible without a clear understanding of the nature of its systemic problems / V.A. Krivoshey // Transport business - 2017. - No. 5 - P. 11-14.
13. 13. White Paper on Efficient and Sustainable Inland Water Transport in Europe. Economic Commission for Europe, Committee on Inland Water Transport // UN - New York, Geneva. - 2011. - P.76
14. Veselov, G.V. Problems and directions of formation of competitive forms and methods of organizing transportation on water transport / G.V. Veselov, S.V. Kostrov // Bulletin of SamGUPS. - 2012. - No. 2 - P.31-36.
15. Mineev, V.I. Substantiation of the effectiveness of combined technologies for the transportation of goods by water transport / V.I. Mineev, S.V. Kostrov // Scientific problems of transport in Siberia and the Far East. - 2013. - No. 1. - P.3-5.

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

**Минеев Валерий Иванович**, д.э.н., профессор, главный научный сотрудник кафедры экономики и менеджмента, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: mineev.vi@vsuwt.ru

**Почкаева Ольга Вадимовна**, к.э.н., доцент, доцент кафедры бухгалтерского учета, анализа и ифыинансов, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: olga156@bk.ru

**Иванов Валерий Михайлович**, к.т.н., доцент, зав. кафедрой экономики и менеджмента, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: i52nn@mail.ru

**Valery I. Mineev**, Doctor of Economics, Professor, Chief Scientific Officer of the Department of Economics and management, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

**Olga V. Pochekaeva**, Ph.D. in Economic Science, Associate Professor of the Department of Accounting, Analysis and Finance, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

**Valery M., Ivanov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Economics and management, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 09.03.2022; опубликована онлайн 07.06.2022.  
Received 09.03.2022; published online 07.06.2022.

УДК 338.47

DOI: 10.37890/jwt.vi71.264

## **Инновации в экономическом развитии речного туризма как основа мультипликативного эффекта в развитии малых городов**

**Н.В. Пумбрасова<sup>1</sup>**

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9644-1721>*

**Е.В. Упадышева<sup>1</sup>**

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

**Аннотация.** В статье рассмотрены перспективы инновационного развития водного транспорта в сфере речных туристических перевозок, предложенные на основе использования зарубежного опыта, определены масштабы реализации потенциального инновационного транспортного проекта и проведена количественная оценка возможного к получению экономического эффекта. Целью проводимого исследования выступает определение способов организации туристических речных перевозок с использованием инноваций для достижения мультипликативного эффекта в развитии экономики малых городов прибрежной зоны. В качестве основных методов исследования авторами определены: аналитический метод, наблюдение, абстрагирование и обобщение. Результатом проведенного исследования является обоснование необходимости применения инноваций в экономическом развитии речного транспорта в целях оптимизации транспортных потоков внутри страны и развития экономики малых городов, расположенных на пути следования пассажирских судов, как мультипликативного эффекта от развития внутреннего туризма.

**Ключевые слова:** инновации, водный транспорт, туристические перевозки, речные электротрамваи, экономический эффект, экологический эффект.

## **Innovations in the economic development of river tourism as the basis of the multiplier effect in the development of small towns**

**Natalya V. Pumbrasova<sup>1</sup>**

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9644-1721>*

**Elena V. Upadysheva<sup>1</sup>**

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

**Abstract.** The article considers the prospects for innovative development of water transport in the field of river tourist transportation, proposed on the basis of the use of foreign experience, determines the scope of implementation of a potential innovative transport project and quantifies the possible economic effect. The purpose of the research is to determine the ways of organizing tourist river transportation using innovations to achieve a multiplier effect in the development of the economy of small coastal towns. As the main research methods, the authors identified: analytical method, observation, abstraction and generalization. The result of the study is the justification of the need to apply innovations in the economic development of river transport in order to optimize transport flows within the country and develop the economy of small towns located along the route of passenger ships, as a multiplier effect of the development of domestic tourism.

**Keywords:** innovations, water transport, tourist transportation, river electric trams, economic effect, environmental effect.

### **Введение**

Одним из направлений развития экономики, обозначенных в Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом до 2035 года (далее - Стратегия), активно обсуждаемой в настоящее время, является развитие системы пассажирских перевозок, в том числе внутренним водным транспортом, с обеспечением необходимой транспортной инфраструктуры. В соответствии с задачами Стратегии, к 2035 году должен быть обеспечен рост мобильности населения на уровне не менее 80% и рост доли поездок общественным транспортом с 54% до 69% с одновременным снижением доли пассажиров, использующих личный транспорт. При этом в Стратегии четко обозначена задача внедрения инноваций на всех видах транспорта в целях повышения эффективности его работы и обеспечения экологической безопасности.

Благодаря богатым природно-климатическим условиям внутренний туризм в нашей стране целесообразнее всего осуществлять с использованием внутреннего водного транспорта. Эта идея не является новой, однако следует отметить, что с приходом новых технологий обновляется и водный транспорт. Он становится более экономически эффективным, более экологичным и комфортным для пассажиров. Примером таких транспортных средств, используемых для внутреннего туризма, могут выступать речные электротрамваи, опыт использования которых заимствован у Голландии, и принимаемые к апробации в 2022 году в г.Москва.

Проблемы функционирования внутреннего водного транспорта и перспективы его развития на территории Российской Федерации активно обсуждаются на правительственном уровне и в научных кругах более десятка лет [1-5], рассматривается экологическая составляющая в работе транспортных систем и ее соответствие международным стандартам [6 - 9], предлагаются различные варианты минимизации издержек транспортных компаний, в том числе с учетом использования инновационных средств [10, 11].

Так, к примеру, совершенствование системы нормирования расхода топлива дает экономию издержек перевозчика по данной статье как минимум на 16%, позволяя соблюдать необходимые экологические нормативы [12]. Расходы на топливо являются одной из наиболее весомых статей расходов предприятий водного транспорта и составляют, как правило, не менее 25% в общем объеме эксплуатационных расходов<sup>1</sup>.

Пассажирские перевозки являются наиболее уязвимым видом речных перевозок с точки зрения обеспечения рентабельности транспортных услуг, что особенно явно прослеживается в сфере регулярных пассажирских перевозок и менее заметно в сфере туристических перевозок<sup>2</sup>.

Тем не менее, исследования показывают, что реализация инфраструктурных проектов по строительству и развитию причальных объектов способна компенсировать недополученные доходы от перевозок добавленной стоимостью и налоговой отдачей от развития торговой деятельности прибрежных зон [13].

Целесообразность развития системы речных пассажирских перевозок детально изучается и обсуждается в научных кругах. Так, нижегородскими учеными доказана и

<sup>1</sup> АО «Судоходная компания «Волжское пароходство» [Электронный ресурс]

<sup>2</sup> Распоряжение Правительства РФ от 28 января 2022 г. № 117-р «Об утверждении Концепции развития круизного туризма в РФ на период до 2024 г.».

просчитана эффективность (монетизированный экономический, социальный и экологический эффект) от внедрения пассажирских перевозок на реке Волга по маршруту Нижний Новгород – Городец – Нижний Новгород с учетом развития сферы туризма [14].

Необходимость развития туристической отрасли как неотъемлемого звена в системе речных перевозок с внедрением инноваций обозначена также и в Транспортной стратегии Российской Федерации. Однако применение инновационной составляющей в туристических речных перевозках в настоящее время требует более детальной научной проработки, поскольку технические и технологические решения в сфере транспорта с каждым годом становятся все более смелыми и на первый взгляд, несмотря на наличие зарубежного опыта, могут не сразу вписаться в существующую транспортную систему нашей страны из-за отсутствия необходимой инфраструктуры и дороговизны ее строительства. Другими словами, вопрос о возможности внедрения инноваций в систему речных перевозок рассматривается с точки зрения готовности самой системы к инновациям и экономической целесообразности таких инноваций. Тем не менее, следует отметить, что давно назревшая потребность в развитии экономики малых городов, страдающих от ежегодного демографического спада и оттока рабочей силы, стимулирует правительство к принятию инновационных решений, выступающих «локомотивом» для развития смежных отраслей и экономики в целом (как мультипликативного эффекта), в первую очередь на территориях, задействованных в туристических маршрутах.

Поэтому целью проводимого авторами исследования выступает определение способов организации туристических речных перевозок с использованием инноваций для достижения мультипликативного эффекта в развитии экономики малых городов прибрежной зоны.

Понятие инновации рассматривалось авторами в предыдущей исследовательской работе [15] и было определено как «внедренное или внедряемое новшество (нововведение), основанное на использовании новых информационно-коммуникационных технологий и современных технических решениях, позволяющее как повысить эффективность бизнес-процессов, так и улучшить качество продукции (транспортных услуг)».

Понятие инноваций в настоящей статье применяется в первую очередь в части инновационных технических решений, таких как использование маломерных судов на электрических двигателях – речных электротрамваев, применяемых в зарубежных странах (Голландия, Канада) и внедряемых в Москве.

Для достижения обозначенной выше цели научного исследования необходимо выполнение следующих задач:

1. Обоснование целесообразности организации системы туристических перевозок речным электротранспортом.
2. Количественная оценка мультипликативного эффекта от развития внутреннего туризма на территории прибрежных зон на конкретном участке водного пути.
3. Определение возможности тиражирования таких перевозок в различных регионах страны.

### **Материалы и методы**

В качестве основных методов исследования авторами статьи определены: аналитический метод, наблюдение, абстрагирование и обобщение.

Опыт применения речных электрических трамваев заимствован у Голландии и запланирован к внедрению в 2022 году в г.Москва.

Использование данного вида транспорта в условиях нашей страны имеет ряд преимуществ по сравнению с другими современными видами речного транспорта, хотя имеются и некоторые недостатки, связанные с отсутствием необходимой инфраструктуры и большой протяженностью водных путей (табл. 1):

*Таблица 1*

**Преимущества и недостатки использования водного транспорта на электродвигателе в российских условиях**

Преимущества	Недостатки
1. Высокая экологичность (отсутствие вредных выбросов в атмосферу). 2. Высокий уровень комфорта для пассажиров (удобный интерьер и наличие свободного wi-fi). 3. Сравнительная экономичность для перевозчика (снижение издержек на топливо) и пассажиров (за счет снижения издержек на топливо может быть обеспечен более низкий уровень тарифов на проезд). 4. Возможность круглогодичного использования.	1. Отсутствие необходимой инфраструктуры, в частности, зарядных станций.

Как видно из представленной таблицы, преимуществ использования электротранспорта явно больше, чем недостатков. Однако наличие такого недостатка, как отсутствие необходимой инфраструктуры, требует первоочередного решения (устранения данного недостатка) для обеспечения самой возможности реализации транспортного проекта по внедрению водного электротранспорта.

Использование речных электротрамваев за счет сравнительно невысокой скорости передвижения будет способствовать развитию внутреннего туризма в первую очередь на небольших расстояниях, а именно в малых городах одного региона. Наличие большого количества историко-культурных ценностей и богатых природных ландшафтов делает возможным разнообразие туристических маршрутов даже в пределах одного региона.

Популяризация внутреннего туризма обеспечит развитие сфер торговли и платного обслуживания в прибрежной зоне малых городов и поселений, что окажет множественный (мультипликативный) эффект в развитии экономики данных территорий в целом, поскольку к сферам торговли и платных услуг локомотивом подтянутся и остальные отрасли экономики, ориентированные на производство товаров народного потребления (востребованными окажутся не только предметы народно-художественного промысла и гостиничные услуги, но также и продукты питания, одежда и прочий ассортимент, относящийся к товарам первой необходимости).

В качестве объекта исследования авторами статьи рассматривается организация туристических перевозок инновационным речным транспортом (речными электротрамваями) в бассейне реки федерального значения Волга.

В результате проведенных исследований, направленных на выявление эффекта от внедрения системы маршрутов речным транспортом на электродвигателе на территории России в бассейне реки Волга путем применения пассажирских судов малого класса, работающих на безуглеродном топливе (в частности, электротрамваев), авторами статьи сделан вывод о возможности получения экономического и экологического эффектов в районах прибрежной зоны.

Экономический эффект в данном случае характеризуется следующими показателями:

1. Рост объема пассажирских перевозок речным транспортом, по мнению авторов, позволит увеличить объемы товарооборота (оборота розничной торговли) в



городах прибрежной зоны. Поскольку Стратегией социально-экономического развития Нижегородской области до 2035 года<sup>3</sup> предусмотрено повышение величины ВРП на душу населения при инновационном развитии экономики на 14,76% и рост налоговых и неналоговых поступлений в консолидированный бюджет области на 14,6% по сравнению с базовым сценарием развития (в 2024 году – ближайший контрольный рубеж в указанной стратегии), то логичным является предположение авторов о соответствующем росте указанных показателей и в прибрежной зоне туристического маршрута (за счет роста туристического потока и повышения мобильности населения (внутренней миграции)).

2. Благодаря увеличению товарооборота за счет развития внутреннего и въездного туризма обеспечивается достижение мультипликативного эффекта в развитии экономики районов прибрежной зоны реки Волга, особенно в малых городах, где развитие торговли повлечет за собой необходимость создания условий для развития других направлений предпринимательства – строительство дорожной и инженерной инфраструктуры, благоустройство территории и т.д., что, в свою очередь, привлечет новых субъектов предпринимательства и обеспечит создание новых рабочих мест, а это, по подсчетам авторов статьи, может обеспечить прирост фонда оплаты труда, формируемого на данных территориях, также предположительно на 14,6%. Развитие инфраструктуры и благоустройство территории помимо создания условий для ведения бизнеса повысит качество жизни, что позволит стабилизировать демографическую ситуацию в малых городах (остановить отток молодежи в крупные города и привлечь новых жителей, желающих поселиться в экономически развитых и экологически чистых районах).

Экологическая составляющая эффекта прослеживается по следующим направлениям:

1. В результате развития пассажирских перевозок речным транспортом снизится нагрузка на трассу федерального значения М7 «Волга», что в свою очередь позволит уменьшить уровень загрязнения придорожных полос, поскольку в летнее время многие отдыхающие предпочтут путешествие на речном транспорте (при условии его финансовой доступности) вместо утомительной поездки в жаркий день на личном автомобиле.
2. В результате применения на речном транспорте альтернативных видов топлива будет обеспечена экологическая безопасность акватории реки и прибрежных зон.

При этом следует отметить, что для обеспечения доступности речного электротранспорта для пассажиров на протяжении всей акватории реки Волга необходимо строительство не только зарядных станций, но и создание всей необходимой речной транспортной инфраструктуры (портов, пристаней, причалов, дебаркадеров). Тем не менее, вложение государства (либо государства и частного бизнеса) в создание такой инфраструктуры и развитие речных туристических перевозок обеспечит возрождение малых городов и сельской местности и даст новый виток в развитии экономики страны, т.к. рост товарооборота на туристических маршрутах приведет к увеличению производства продукции местных товаропроизводителей и созданию новых рабочих мест, а, соответственно, и к росту налоговых поступлений, как в бюджеты муниципальных образований, так и в федеральный и региональные бюджеты.

---

<sup>3</sup> Постановление Правительства Нижегородской области от 21 декабря 2018 года № 889 «Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Нижегородской области до 2035 года» (с изменениями на 31 декабря 2021 года)

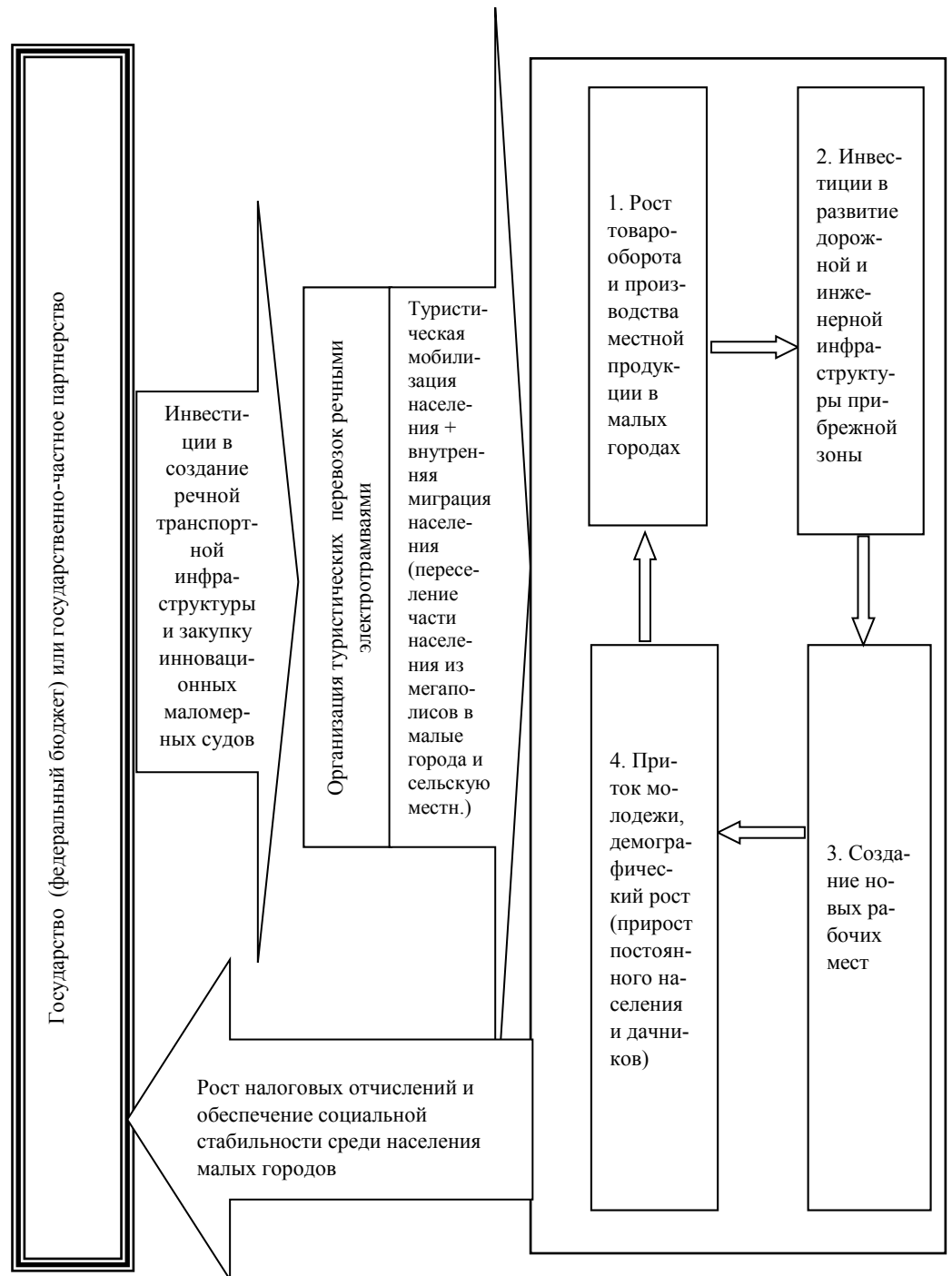


Рис. 1. Мультипликативный эффект в развитии экономики от внедрения регулярных маршрутов туристических перевозок по реке федерального значения Волга

Достижение мультипликативного эффекта в развитии экономики за счет организации системы туристических речных перевозок авторами предлагается представить наглядно в виде схемы (рис. 1).

Безусловно, для реализации такого крупномасштабного проекта необходимо детально просчитать все возможные риски. К тому же стоимость самих электротрамваев на порядок выше других (менее инновационных) транспортных средств, и составляет приблизительно 180 млн.руб.<sup>4</sup>, из чего следует предположение о невысокой рентабельности туристических перевозок электротрамваями и довольно длительном сроке окупаемости такого транспортного проекта. Однако, опираясь на ключевые индикаторы достижения целей Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом до 2035 года, используя данные о социально-экономическом развитии территорий прибрежной зоны, можно количественно оценить потенциальный уровень создаваемой добавленной стоимости, или дохода, возможного к получению в случае реализации такого транспортного проекта, что обеспечит совокупную рентабельность проекта для государства, которое в свою очередь способно субсидировать подобные инновационные проекты, даже столь затратные, но перспективные.

Для общего понимания авторы предлагают обозначить весь процесс инвестирования в организацию перевозок электротрамваями *транспортным проектом (или проектом)*, а строительство необходимой транспортной инфраструктуры – *инфраструктурным проектом*, являющимся частью транспортного проекта.

При этом, по мнению авторов статьи, доходы целесообразно разделить на две группы:

- 1) доходы перевозчика как частный эффект от реализации проекта;
- 2) доходы смежных отраслей, получаемые в результате развития туризма в прибрежной зоне.

Инвестиции в проект также необходимо разделить на две группы: государственные (строительство транспортной инфраструктуры, субсидирование перевозчика) и частные (приобретение судов).

Результатом реализации проектов будет получение экономического эффекта, формулы которого представлены ниже.

С целью математического описания видов и состава доходов, планируемых к получению при реализации транспортного проекта, авторы предлагают воспользоваться терминологией, приведенной в методике, разработанной и утвержденной Правительством РФ для оценки социально-экономических эффектов от проектов строительства (реконструкции) и эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры, планируемых к реализации с привлечением средств федерального бюджета, а также с предоставлением государственных гарантий Российской Федерации и налоговых льгот.<sup>5</sup>

Так, прирост валовой добавленной стоимости, создаваемой непосредственным к-м участником проекта, математически возможно представить в виде формулы 1:

$$ВДС_{прямк} = \sum B_i^t \times (1 - d_{н.л.м.и}) \quad (1)$$

<sup>4</sup> <https://rbc-gu.turbopages.org/rbc.ru/s/business/12/01/2022/61dc58a09a7947566e2fbff0>

<sup>5</sup> Постановление Правительства Российской Федерации от 26 ноября 2019 г. № 1512 «Об утверждении методики оценки социально-экономических эффектов от проектов строительства (реконструкции) и эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры, планируемых к реализации с привлечением средств федерального бюджета, а также с предоставлением государственных гарантий Российской Федерации и налоговых льгот»

где  $B_i^t$  - суммарный прирост выручки непосредственного участника проекта от реализации товаров (работ, услуг)  $i$ -го вида в году  $t$ ;

$d_{n.имп}$  - коэффициент полной импорттоемкости товаров (работ, услуг)  $i$ -го вида, характеризующий зависимость соответствующих конечных товаров (работ, услуг) от импортных комплектующих.

Прирост валовой добавленной стоимости смежных отраслей авторы статьи предлагают рассчитывать по упрощенной формуле, базирующейся на стандартных статистических приемах (формула 2). Под смежными отраслями в данном случае (в отличие от упомянутой выше методики) понимаются отрасли торговли и платного обслуживания населения, получающие прирост показателей оборота розничной торговли в результате развития туризма в прибрежной зоне.

$$ВДС_{см}^t = \sum PП_i^t \times T_{np} \quad (2)$$

где  $PП_i^t$  - стоимость  $i$ -го вида российской продукции, реализуемой на территории реализации проекта в году  $t$ ;

$T_{np}$  - темп прироста показателей, получаемый в результате реализации проекта.

С целью математического описания возможного к получению общего мультипликативного эффекта авторы статьи предлагают использовать формулу мультипликатора инвестиций, предложенную Дж.М.Кейнсом и упоминаемую Дж.Хиксом, П.Самуэльсоном и другими последователями кейнсианской теории, адаптировав её под реализацию рассматриваемого проекта (формула 3):

$$M = \frac{\Delta ВВП}{\Delta I} \quad (3)$$

где  $\Delta ВВП$  – изменение в величине валового внутреннего продукта, получаемое в результате инвестирования в проект (в рассматриваемом случае это будет изменение в величине валового регионального продукта, рассчитанное как сумма  $ВДС_{прямк}$  и  $ВДС_{см}$ );

$\Delta I$  – изменение величины инвестиций (за счет инвестирования в транспортный и инфраструктурный проект).

### **Результаты**

В целях исследования в качестве конкретного участка водного пути авторами выбран участок реки Волга, расположенный на территории Нижегородской области, где заинтересованными в реализации транспортного проекта становятся девять муниципальных образований, расположенных на берегах Волги.

Для удобства расчета прогнозных показателей авторами статьи сделано предположение о возможности внедрения инновационных речных туристических перевозок речными электротрамваями в 2024 году.

При этом за основные исходные данные для исследования авторами приняты следующие параметры:

- протяженность реки Волга на территории Нижегородской области – 240 км;

- возможность осуществления поездки на речном электротрамвае без подзарядки – 200 км, вместительность судна – 50 человек<sup>6</sup>;
- количество остановок – минимум 18 (в каждом районе минимум 2 остановки – в ту и в обратную сторону);
- количество закупаемых речных электротрамваев – 4 ед.;
- количество рейсов в день, осуществляемых каждым речным электротрамваем – 4;
- стоимость одного пассажиро-километра – 10 руб.;
- средняя дальность поездки пассажиров в день – 50 км;
- количество перевезенных пассажиров в день – 800 чел. (4 эл.тр. x 4 рейса x 50 чел.);
- коэффициент полной импортности транспортных услуг (зависимости от импортных составляющих) – 0,1.
- стоимость одного речного электротрамвая – 180 млн.руб.<sup>7</sup>;
- инвестиции в строительство инфраструктуры – 15,8 млрд.руб.<sup>8</sup>

В целях определения экономического эффекта, получаемого перевозчиком, рассчитаем потенциальный суммарный прирост его выручки за год ( $B_i^t$ ), путем умножения стоимости одного пассажиро-километра на среднюю дальность поездки пассажиров в день на количество перевезенных пассажиров в день и на количество дней в году:

$$10 \text{ руб.} \times 50 \text{ км} \times 800 \text{ чел.} \times 365 \text{ дн.} = 146\,000\,000 \text{ руб. (146 млн.руб.)}$$

Так, рассматривая экономический эффект, возможный к получению перевозчиком, используя формулу 1, получаем:

$$\text{ВДС прям} = 146 \text{ млн. руб.} \times (1 - 0,1) = 131,4 \text{ млн. руб.}$$

Рассчитаем объем инвестиций в основной капитал путем умножения стоимости одного речного электротрамвая на количество закупаемых речных электротрамваев:

$$180 \text{ млн. руб.} \times 4 \text{ ед.} = 720 \text{ млн.руб.}$$

В целях определения приемлемости реализации проекта по срокам его окупаемости, рассчитаем предполагаемый срок окупаемости проекта путем деления объема инвестиций в основной капитал на годовой экономической эффект (ВДС прям).

Срок окупаемости проекта для перевозчика составит:

$720 \text{ млн. руб.} / 131,4 \text{ млн.руб.} = 5,5 \text{ лет}$  (что, по мнению авторов статьи, является приемлемым с точки зрения адекватности сроков окупаемости). Однако следует заметить, что такой результат получается лишь при полной загрузке каждого судна пассажирами.

Прирост доходов, получаемых смежными отраслями ( $ПП_i^t$ ), рассчитан авторами с использованием данных о социально-экономическом состоянии районов прибрежной зоны (Таблица 2) с учетом ключевых индикаторов Стратегии развития Нижегородской области до 2035 года (путем умножения показателя ВРП на душу

<sup>6</sup> <https://www.atorus.ru/news/press-centre/new/59307.html>

<sup>7</sup> <https://rbc-ru.turbopages.org/rbc.ru/s/business/12/01/2022/61dc58a09a7947566e2fbff0>

<sup>8</sup> <https://rbc-ru.turbopages.org/rbc.ru/s/business/12/01/2022/61dc58a09a7947566e2fbff0> (по оценкам авторов на примере г.Москва)

населения на заложенный в данной стратегии прирост, а именно - прирост валового регионального продукта на душу населения при инновационном сценарии развития экономики на 14,67% по сравнению с базовым сценарием развития). При этом за суммарное значение таких доходов принимается величина оборота розничной торговли, формируемая на рассматриваемой территории.

Так, в 2021 году  $\sum PП_i^t$  в соответствии с данными таблицы 2 равняется 342 066,2 млн. руб.

Таблица 2

**Основные экономические показатели муниципальных образований Нижегородской области<sup>9</sup>, расположенных на берегах реки Волга, за 2021 год**

№ п/п	Наименование муниципального образования	Численность постоянного населения, чел.	Оборот розничной торговли на территории, млн.руб.	Объем отгруженной продукции, произведенной на территории, млн. руб.	ВРП на душу населения, тыс.руб. / чел.
1	Городской округ город Чкаловск	19170	1577,97	3357,37	175,1367
2	Городской округ Сокольский	12624	611,52	1462,49	115,85
3	Городецкий муниципальный район	84607	8076,13	43304,17	511,8273
4	Балахнинский муниципальный округ	75057	7319,69	32396,99	431,6318
5	Городской округ город Бор	117326	12532,60	61535,89	524,4864
6	Городской округ город Нижний Новгород	1263650	272353,2	1040091,45	823,0851
7	Кстовский муниципальный район	125369	34734,57	163051,11	1300,57
8	Лысковский муниципальный округ	36744	3614,71	9152,76	249,0954
9	Городской округ Воротынский	17275	1245,84	399,78	23,14211
	<b>Итого:</b>	<b>1751822</b>	<b>342066,2</b>	<b>1354752</b>	<b>773,3388</b>

С учетом прогнозируемого ежегодного темпа инфляции в 4% (в 2022 – 2024 гг.), в рассматриваемом 2024 году при базовом сценарии развития экономики (без реализации инновационного проекта) показатель  $\sum PП_i^t$  составит:

<sup>9</sup> Официальные данные Территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Нижегородской области (<https://nizhstat.gks.ru/>).

342 066,2 млн. руб.  $\times 1,04 \times 1,04 \times 1,04 = 384\ 777,95$  млн. руб.

А с учетом реализации инновационного транспортного проекта прирост валовой добавленной стоимости смежных отраслей в 2024 году составит (формула 2):

$$ВДС_{см}^{2024} = 384\ 777,95 \text{ млн.руб.} \times 14,67\% = 56\ 446,93 \text{ млн.руб.}$$

Изменение в величине валового регионального продукта ( $\Delta ВРП$ ), получаемое в результате реализации инновационного транспортного проекта, рассчитанное как сумма  $ВДС_{прямк}$  и  $ВДС_{см}^t$ , составит:

$$\Delta ВРП = 131,4 \text{ млн. руб.} + 56\ 446,93 \text{ млн.руб.} = 56\ 578,33 \text{ млн.руб.}$$

Общий объем инвестиций в проект (закупку транспорта и строительство необходимой инфраструктуры), или прирост инвестиций за счет реализации проекта составит:

$$\Delta I = 720 \text{ млн.руб. (закупка речных электротрамваев)} + 15\ 800 \text{ млн.руб. (строительство инфраструктуры)}^{10} = 16\ 520 \text{ млн.руб.}$$

Мультипликативный эффект, рассчитываемый по формуле 3, в исследуемом 2024 году будет равен следующему значению:

$$M = 56\ 578,33 \text{ млн.руб.} / 16\ 520 \text{ млн.руб.} = 3,42$$

Это означает, что ожидаемый экономический эффект в 3,42 раза превысит вложенные инвестиции.

Таким образом, теоретически ясно прослеживается положительный экономический эффект от внедрения инноваций в сфере туристических речных перевозок путем использования речных электротрамваев даже на расстояниях более 200 км (т.е. с учетом строительства зарядных станций и другой инфраструктуры, т.к. максимальная дальность хода без подзарядки составляет 200 км). и, тем самым, доказывается целесообразность реализации транспортных и инфраструктурных проектов на рассматриваемой территории.

### **Обсуждение**

Возможность круглогодичного использования речных электротрамваев в российских климатических условиях создает альтернативу автомобильному транспорту при перевозке пассажиров, что позволит разгрузить федеральные трассы и оптимизировать транспортные потоки, что в свою очередь окажет благоприятное воздействие как на состояние атмосферного воздуха и снизит уровень аварийности на автомобильных дорогах.

Однако использование ледоколов в зимнее время как вспомогательных средств для речных электротрамваев в настоящее время является мало изученным с точки зрения безопасности для водных обитателей, поэтому требует более детального исследования с позиции сопоставления экономической пользы и экологической безопасности.

<sup>10</sup> Рассчитаны по аналогии с планируемыми инвестициями в г.Москва.

Но в случае технической доработки самих электросудов, позволяющей исключить зависимость от ледоколов в зимнее время (к примеру, дооборудование судов воздушными подушками), электрические речные трамваи в перспективе прочно займут лидерские позиции не только в туристических перевозках, но и в регулярных пассажирских перевозках.

Таким образом, возможность тиражирования практики применения электрических речных трамваев в различных регионах России будет определена после дополнительных исследований на предмет соотношения экономической целесообразности и экологической безопасности, а точнее – в случае одновременного выполнения данных условий.

### **Выводы**

Таким образом, авторы статьи пришли к выводу о целесообразности внедрения туристических маршрутов речным транспортом с использованием инновационных транспортных средств – речных электротрамваев (в частности на реке Волга), что приведет к повышению интереса граждан к речным перевозкам, разгрузит автомобильные транспортные артерии и даст новый стимул к развитию внутреннего туризма. А это в свою очередь повлечет за собой развитие экономики малых городов прибрежной зоны, что в настоящее время является актуальной и широко обсуждаемой проблемой.

### **Список литературы**

1. Чуплыгин Г.Н. Стратегические направления развития водного транспорта. Научные проблемы водного транспорта. 2013. № 37. С. 125 - 131.
2. Леквешвили Г.А., Гогиашвили П.Г., Чоговадзе Д.Т., Кбилашвили Д. Г. Применение генетического алгоритма оптимизации в процессе управления городскими пассажирскими перевозками / *Juvenis scientia*. 2018 № 11 – С. 5–8. <https://doi.org/10.32415/jscientia.2018.11.01>
3. O. Shirokorad, Regional Information and Technology Aspects of Increase Quality of Passenger Transportation / O.Shirokorad, S. Arkhipov, P. Volodkin // *IOP Conf. Series: earth and environmental science* 272 (2019). pp. 1 – 6. Available at: <https://doi.org/article/10.1088/1755-1315/272/3/032058/pdf>. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/3/032058>.
4. Платов Ю.И. Влияние субъективных факторов на внедрение информационных технологий на речном транспорте. Научные проблемы водного транспорта, (63), С.138-147. (2020) <https://doi.org/10.37890/jwt.vi63.84>.
5. Телегин А.И., Гончарова Н.В., Юлова А.В. Метод формирования возможных типовых транспортно-логистических схем перевозки пассажира на внутригородских и пригородных маршрутах для определения времени поездки. Научные проблемы водного транспорта, (63), С.148-159 (2020). <https://doi.org/10.37890/jwt.vi63.85>.
6. F.Neugebauer. EMAS and ISO 14001 in the German industry complements or substitutes? *Journal of Cleaner Production* 37 (2012) 249-256.
7. W.M. To, P.K.C. Lee. Diffusion of ISO 14001 environmental management system: global, regional and country-level analyses. *Journal of Cleaner Production* 66 (2014) 489-498.
8. Окрут С. В., Безгина Ю. А., Степаненко Е. Е., Зеленская Т. Г., Халикова В. А.. Оценка влияния автотранспорта на экологическое состояние атмосферного воздуха урбанизированных территорий. Процедура исследования транспорта. 2022. № 61 С.437-440.
9. B.Xie, X.Zhang, J. Lu, F.Liu, Y.Fan. Original Articles Research on ecological evaluation of Shanghai port logistics based on emergy ecological footprint models. *Ecological Indicators* 139 (2022) 108916. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108916>.



10. Цверов В.В., Бугрова Е.Г., Костров В.Н., Коршунов Д.А. Оценка эффективности снабжения судоходных компаний материально-техническими ресурсами. Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 4 – 1 (50). С.201-208 DOI: 10.37220/МИТ.2020.50.4.028
11. Каретников В.В., Пащенко И.В., Соколов А.И. перспективы внедрения безэкипажного судоходства на внутренних водных путях российской федерации. Вестник государственного университета морского и речного флота им. Адмирала С.О. Макарова. 2017. № 3 – 9. С. 619-627. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-619-627.
12. Уставщиков И.В. Совершенствование нормирования ходового времени и расхода топлива для речных судов в условиях цифровизации. Научные проблемы водного транспорта. 2020. № 64. С. 186-192. DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi64.110>.
13. Никулина М.В., Подобед В.А. Особенности обоснования эффективности строительства речных причалов предприятий. Научные проблемы водного транспорта. 2020. № 64. С. 164 – 170. DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi64.107>.
14. Иванов В.М., Репина Д.А., Мосинцев А.В. Эффективность проектов организации пассажирских перевозок на водном транспорте. Научные проблемы водного транспорта. 2021. № 67. С. 79 - 93. DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi67.193>
15. Пумбрасова Н.В., Упадышева Е.В. Фактор инновационности в системе оценки качества транспортных услуг. Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. 403 LNNS, С. 827-836. DOI: 10.1007/978-3-030-96383-5\_91.

#### References

1. Chuplygin G.N. Strategicheskies napravleniya razvitiya vodnogo transporta. Nauchnye problemy vodnogo transporta. 2013. № 37, 125 - 131.
2. G. Lekveishvili, Application of genetic algorithm of optimization during the process of urban passenger traffic management / G. Lekveishvili, P. Gogiashvili, J. Chogovadze, D. Kbilashvili // Juvenisscientia. – 2018. – Is.11. – Pp. 5–8. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/application-of-genetic-algorithm-of-optimization-during-the-process-of-urban-passenger-traffic-management/viewer>. <https://doi.org/10.32415/jscientia.2018.11.01>
3. O. Shirokorad, Regional Information and Technology Aspects of Increase Quality of Passenger Transportation / O. Shirokorad, S. Arkhipov, P. Volodkin // IOP Conf. Series: earth and environmental science 272 (2019). Available at: <https://doi.org/article/10.1088/1755-1315/272/3/032058/pdf>. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/3/032058>.
4. Yu. Platov. The influence of subjective factors on the introduction of information technologies in river transport. Scientific problems of water transport, (63), 138-147. (2020) <https://doi.org/10.37890/jwt.vi63.84>.
5. Telegin, N. Goncharova, A. Yulova. A method for forming possible standard transport and logistics schemes for passenger transportation on intra-city and suburban routes to determine the travel time. Scientific problems of water transport, (63), 148-159. (2020). <https://doi.org/10.37890/jwt.vi63.85>.
6. F. Neugebauer. EMAS and ISO 14001 in the German industry complements or substitutes? Journal of Cleaner Production 37 (2012) 249-256.
7. W.M. To, P.K.C. Lee. Diffusion of ISO 14001 environmental management system: global, regional and country-level analyses. Journal of Cleaner Production 66 (2014) 489-498.
8. S. V. Okrut, J. A. Bezgina, E. E. Stepanenko, T. G. Zelenskaya, V. A. Khalikova. Assessment of the Impact of Motor Transport on the Ecological State of Atmospheric Air of Urbanized Areas. Transportation Research Procedia 61 (2022) 437–440.
9. B. Xie, X. Zhang, J. Lu, F. Liu, Y. Fan. Original Articles Research on ecological evaluation of Shanghai port logistics based on emergy ecological footprint models. Ecological Indicators 139 (2022) 108916. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108916>.

10. V. Tsverov, E. Bugrova, V. Kostrov, D. Korshunov. Evaluation of the efficiency of supply of material and technical resources to shipping companies. *Marine intellectual technologies*. № 4 part 1, 2020. DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.028
11. V. Karetnikov, I. Pashchenko, A. Sokolov. Prospects of introducing unmanned navigation on inland waterways of the Russian Federation. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-619-627.
12. I. Ustavshchikov. The improvement of rationing running time and fuel consumption for river vessels in the context of digitalization. DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi64.110>.
13. M. Nikulina, V. Podobed. The features of effectiveness substantiation for construction of river piers of enterprises. DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi64.107>.
14. V. Ivanov, D. Repina, A. Mosintsev. Efficiency of projects for the organization of passenger transportation by water transport. *Russian Journal of Water Transport*. №67(2), 2021, p. 79 – 93. DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi67.193>
15. N. Pumbrasova, 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. DOI: 10.1007/978-3-030-96383-5\_91.

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

**Пумбрасова Наталья Владимировна**,  
к.э.н., доцент, доцент кафедры  
бухгалтерского учета, анализа и финансов,  
Волжский государственный университет  
водного транспорта» (ФГБОУ ВО  
«ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород,  
ул. Нестерова, 5, e-mail: [target75@mail.ru](mailto:target75@mail.ru)

**Natalya V. Pumbrasova**, Ph.D. in Economic  
Science, Associate Professor of the  
Department of accounting, analysis and  
Finance, Volga State University of Water  
Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod,  
603951, e-mail: [target75@mail.ru](mailto:target75@mail.ru)

**Упадышева Елена Владимировна**,  
аспирант кафедры бухгалтерского учета,  
анализа и финансов, Волжский  
государственный университет водного  
транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951,  
г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5,  
e-mail: [upadysheva@bk.ru](mailto:upadysheva@bk.ru)

**Elena V. Upadysheva**, postgraduate of the  
Department of accounting, analysis and  
Finance, Volga State University of Water  
Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod,  
603951, e-mail: [upadysheva@bk.ru](mailto:upadysheva@bk.ru)

Статья поступила в редакцию 18.05.2022; опубликована онлайн 07.06.2022.  
Received 18.05.2022; published online 07.06.2022.

УДК 656.629

DOI:10.37890/jwt.vi71.260

## **Методика расчета эксплуатационных расходов для судна на воздушной подушке, используемого при социальных региональных перевозках**

**А.В. Юлова<sup>1</sup>**

**А.О. Ничипорук<sup>1</sup>**

*ORCID 0000-0002-7763-2829*

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

**Аннотация.** В статье предлагается методический подход по определению эксплуатационных расходов для судна на воздушной подушке. Представленная методика отличается учетом особенностей эксплуатации судов на воздушной подушке в течение круглого года. При этом методика позволяет определять эксплуатационные расходы отдельно по навигационному (летнему) и межнавигационному (зимнему) периодам. В статье произведена апробация методики на примере внутригородских и пригородных маршрутов Нижегородского транспортного узла. Также выполнена аппроксимация результатов расчетов, использование которой для конкретных маршрутов позволит быстро находить величину себестоимости пассажирских перевозок и зависящую от нее стоимость проезда пассажира. В заключении определены сферы применения предлагаемого методического подхода при обосновании затрат и размеров тарифов на перевозки пассажиров на пригородных и внутригородских линиях, а также для определения сфер использования и конкурентоспособности судов на воздушной подушке по сравнению с другими видами транспорта.

**Ключевые слова:** внутренний водный транспорт, суда на воздушной подушке, эксплуатационные расходы, региональные перевозки.

## **Operating cost calculation methodology for hovercraft used in social regional transportation**

**Anastasia V. Yulova<sup>1</sup>**

**Andrey O. Nichiporuk<sup>1</sup>**

*ORCID 0000-0002-7763-2829*

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

**Abstract.** The article proposes a methodical approach to determine operating costs for a hovercraft. The presented method differs by taking into account the peculiarities of operating hovercraft during the round year. In this case, the methodology allows you to determine operating costs separately for navigation (summer) and internavigation (winter) periods. The article tested the methodology using the example of intracity and suburban routes of the Nizhny Novgorod transport hub. The calculation results were also approximated, the use of which for specific routes will make it possible to quickly find the value of the cost of passenger transportation and the passenger's fare depending on it. The conclusion defines the scope of application of the proposed methodological approach when justifying the costs and size of tariffs for passenger transportation on suburban and intra-city lines, as well as for determining the areas of use and competitiveness of hovercraft compared to other modes of transport.

**Keywords:** inland water transport, hovercraft, operating costs, regional transportation.

### **Введение**

В Российской Федерации на приречных территориях располагается более двух десятков мегаполисов, вокруг которых можно насчитать множество небольших городских и пригородных населенных пунктов в пределах расстояния в 150 километров, также находящихся вблизи от внутренних водных путей [1, 2]. В этих населенных пунктах проживает примерно треть населения страны. При этом каждый третий житель, располагая личным автотранспортом, предпочитает активно использовать его для поездки на работу, а также в личных целях и для отдыха.

Следует отметить, что в последние годы увеличивается количество проблем, связанных с использованием и работой автомобильного транспорта, как личного, так и общественного, что особенно касается его эксплуатации и осуществления пассажирских перевозок в «часы пик» и при неблагоприятных погодных условиях. Соответственно, снижается качество транспортного обслуживания, доступность транспортных услуг, возможность беспрепятственно и безопасно пользоваться личным и общественным транспортом.

Особенно остро стоят данные проблемы в тех мегаполисах, где региональные и муниципальные власти с недостаточным вниманием относятся к развитию общественного автомобильного транспорта, а также поиску возможных вариантов переключения части пассажиропотоков на альтернативные виды транспорта, в том числе внутренний водный. Одним из направлений решения указанной проблемы может стать перевод части внутригородских и пригородных пассажиропотоков с автомобильного и электрического транспорта на перевозки по имеющимся внутренним водным путям. Для этого могут быть использованы суда как водоизмещающего типа, так и считающиеся инновационными для таких перевозок – суда на воздушной подушке (СВП) и на подводных крыльях. Причем, если мы говорим о рассмотрении возможности и перспектив организации альтернативных перевозок тем, что в настоящее время осуществляются на общественном автомобильном и городском электрическом транспорте, то следует иметь в виду необходимость предоставления пассажирам услуг водного транспорта как минимум на том же уровне или близком к нему. В первую очередь, это касается организации перевозок пассажиров со скоростью 50-70 км/ч (что соответствует скорости движения автотранспорта) в течение круглого года, а не только в навигационный период. Указанным требованиям из скоростных судов и судов инновационного типа в наибольшей степени удовлетворяют суда на воздушной подушке [3-5].

При этом для обоснования сфер эффективного использования СВП по сравнению с другими видами транспорта, а также определения конкурентоспособных тарифов на пассажирские перевозки, по мнению авторов, необходима разработка методики расчета эксплуатационных затрат, учитывающей особенности и специфику работы СВП, а также возможности их использования в круглогодичный период.

### **Существующие методические подходы и рекомендации**

Ряд авторов и ученых в своих работах обращают внимание на то, что критерий стоимости (тарифа) перевозки пассажира является одним из основных, используемых для сравнения различных вариантов организации доставки пассажиров. При этом отмечается, что в основе определения стоимости или тарифа на перевозку лежит определение эксплуатационных затрат [3, 5-7]. Конкретная методика

расчета затрат либо не приводится, либо дается в общем виде, разработанном для пассажирского флота, эксплуатируемого лишь в межнавигационный период [6-8].

Нами ранее были сформулированы основные принципы организации круглогодичных перевозок пассажиров с использованием СВП, а также предложены типовые транспортно-логистические схемы таких перевозок [1-2]. Также были изучены требования нормативно-правовых документов в рассматриваемой области, регламентирующие особенности эксплуатации СВП, пассажирского флота, его работу в различное время суток и времена года, требования к порядку обслуживания пассажиров и наличию терминальной инфраструктуры.

Таким образом, была сформирована база для разработки методического подхода, учитывающего специфику организации пассажирских перевозок на внутригородских и пригородных маршрутах при круглогодичной эксплуатации (т.е. в навигационный (летний) и межнавигационный (зимний) период).

### **Разработанная методика**

Предлагаемая авторами методика расчета эксплуатационных расходов разработана с учетом действующих нормативных документов, практики перевозок, а также рыночных цен, определяющих стоимость топлива и др.

В целом эксплуатационные расходы по СВП ( $\sum \mathcal{E}_{\text{свп}}$ ) рассчитываем по основным группам, которые формируются и отражаются в документах владельца таких судов.

1. Оплата труда экипажа судна в период эксплуатации СВП может быть определена в общем виде по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{зз}} = \mathcal{Z}_{\text{со}} \cdot n \cdot K_{\text{у}} \cdot K_{\text{пз}} \cdot K_{\text{до}} \cdot T_{\text{гп}},$$

где  $\mathcal{E}_{\text{зз}}$  – заработная плата экипажа судна, руб.;

$\mathcal{Z}_{\text{со}}$  – среднесуточный размер оплаты труда одного члена экипажа, руб.;

$n$  – число членов экипажа, чел.;

$K_{\text{у}}$  – коэффициент, учитывающий условия работы;

$K_{\text{пз}}$  – коэффициент, учитывающий повышение зарплаты за счет премий, выслуги лет и др.;

$K_{\text{до}}$  – коэффициент, учитывающий доплаты за отгулы, отпуска, работу в зимний период, переработку;

$T_{\text{гп}}$  – продолжительность годового периода эксплуатации судна, сут.

Расходы на заработную плату экипажа СВП в течение года зависят от периода эксплуатации (летний, зимний), от времени и объема проведения регламентных (ремонтных) работ, от условий работы, состава экипажа, применяемых коэффициентов доплат. С учетом этого формула может быть преобразована к следующему виду:

$$\mathcal{E}_{\text{зз}} = \mathcal{E}_{\text{лп}} + \mathcal{E}_{\text{зп}} + \mathcal{E}_{\text{рр}},$$

где  $\mathcal{E}_{\text{лп}}$  – заработная плата экипажа судна за летний период эксплуатации, руб.;

$\mathcal{E}_{\text{зп}}$  – заработная плата экипажа судна за зимний период эксплуатации, руб.;

$\mathcal{E}_{\text{рр}}$  – заработная плата экипажа судна за период проведения регламентных (ремонтных, ввода-вывода в эксплуатацию и др.) работ, руб.;

$$\mathcal{E}_{\text{лп}} = \mathcal{Z}_{\text{со}}^{\text{л}} \cdot n_{\text{л}} \cdot K_{\text{у}}^{\text{л}} \cdot K_{\text{пз}}^{\text{л}} \cdot K_{\text{до}}^{\text{л}} \cdot T_{\text{лп}};$$

$$\mathcal{E}_{\text{зп}} = \mathcal{Z}_{\text{со}}^{\text{з}} \cdot n_{\text{з}} \cdot K_{\text{у}}^{\text{з}} \cdot K_{\text{пз}}^{\text{з}} \cdot K_{\text{до}}^{\text{з}} \cdot T_{\text{зп}};$$

$$\mathcal{E}_{\text{рр}} = \mathcal{Z}_{\text{со}}^{\text{рр}} \cdot n_{\text{рр}} \cdot K_{\text{у}}^{\text{рр}} \cdot K_{\text{пз}}^{\text{рр}} \cdot K_{\text{до}}^{\text{рр}} \cdot T_{\text{рр}},$$

где  $\mathcal{Z}_{\text{со}}^{\text{л}}$ ,  $\mathcal{Z}_{\text{со}}^{\text{з}}$ ,  $\mathcal{Z}_{\text{со}}^{\text{рр}}$  – среднесуточный размер оплаты труда одного члена экипажа соответственно в летний, зимний период и во время проведения регламентных работ, руб.;

$n_l, n_z, n_{pp}$  – число членов экипажа соответственно в летний, зимний период и во время проведения регламентных работ, чел.;

$K_y^l, K_y^z, K_y^{pp}$  – коэффициенты, учитывающие условия работы (соответственно для летнего, зимнего периода и периода проведения регламентных работ);

$K_{пз}^l, K_{пз}^z, K_{пз}^{pp}$  – коэффициенты, учитывающие повышение зарплаты за счет премий, выслуги лет и др. (соответственно для летнего, зимнего периода и периода проведения регламентных работ);

$K_{до}^l, K_{до}^z, K_{до}^{pp}$  – коэффициенты, учитывающие доплаты за отгулы, отпуска, работу в зимний период, переработку (соответственно для летнего, зимнего периода и периода проведения регламентных работ);

$T_{лп}, T_{зп}, T_{рр}$  – продолжительность эксплуатации судна соответственно в летний и зимний периоды, период проведения регламентных работ, сут.

При необходимости определения себестоимости перевозок за летний или зимний период эксплуатационные расходы на оплату труда при проведении регламентных работ в летний (зимний) период будут определяться следующим образом:

$$\mathcal{E}_{рр}^{л(з)} = \mathcal{Z}_{со}^{рр} \cdot n_{рр} \cdot K_y^{рр} \cdot K_{пз}^{рр} \cdot K_{до}^{рр} \cdot T_{рр}^{л(з)},$$

где  $T_{рр}^{л(з)}$  – продолжительность проведения регламентных работ соответственно в летний или зимний период, сут.

2. Расходы на рацион бесплатного питания экипажа:

$$\mathcal{E}_{бп} = q_{бп} \cdot (n_l \cdot T_{лп} + n_z \cdot T_{зп} + n_{рр} \cdot T_{рр}),$$

где  $q_{бп}$  – ставка суточного рациона бесплатного питания экипажа судна, руб/сут.

Для определения расходов на рацион бесплатного питания за летний (зимний) период предлагается использовать следующие формулы:

$$\mathcal{E}_{бп}^l = q_{бп} \cdot (n_l \cdot T_{лп} + n_{рр} \cdot T_{рр}^l);$$

$$\mathcal{E}_{бп}^z = q_{бп} \cdot (n_z \cdot T_{зп} + n_{рр} \cdot T_{рр}^z).$$

3. Отчисления на социальные нужды:

$$\mathcal{E}_{сн} = 0,01 \cdot C_{св} \cdot \mathcal{E}_{зз},$$

где  $C_{св}$  – суммарная ставка отчислений на социальные нужды, %;

$$C_{св} = C_{пс} + C_{сс} + C_{мс},$$

где  $C_{пс}$  – ставка отчислений на обязательное пенсионное страхование, в относительных единицах (в 2022 году составляет 22%);

$C_{сс}$  – ставка отчислений на обязательное социальное страхование на случай нетрудоспособности и в связи с материнством, % (в 2022 году составляет 2,9%);

$C_{мс}$  – ставка отчислений на обязательное медицинское страхование, % (в 2022 году составляет 5,1%).

При необходимости определения расходов отдельно за летний ( $\mathcal{E}_{сн}^l$ ) и зимний ( $\mathcal{E}_{сн}^z$ ) период формула определения отчислений на социальные нужды может быть преобразована к виду:

$$\mathcal{E}_{сн}^{л(з)} = 0,01 \cdot C_{св} \cdot (\mathcal{E}_{лп(зп)} + \mathcal{E}_{рр}^{л(з)}).$$

4. Эксплуатационные затраты судоходной компании на топливо в соответствии с летним ( $\mathcal{E}_T^l$ ) и зимним ( $\mathcal{E}_T^z$ ) периодами эксплуатации:

$$\mathcal{E}_T^l = \mathcal{C}_T^l \cdot m_l \cdot T_{лп} (t_x^l \cdot b_x^T + t_{ст}^l \cdot b_{ст}^T);$$

$$\mathcal{E}_T^z = \mathcal{C}_T^z \cdot m_z \cdot T_{зп} (t_x^z \cdot b_x^T + t_{ст}^z \cdot b_{ст}^T + t_{от} \cdot b_{от}^T) \cdot K_T,$$

где  $\mathcal{C}_T^l, \mathcal{C}_T^z$  – цена судового топлива соответственно в летний (зимний) период, руб/л;

$m_l, m_z$  – количество рейсов, совершаемых СВП за одни сутки на данном маршруте соответственно в летний (зимний) период, ед.;

$t_x^l, t_x^z$  – время, затрачиваемое СВП на данной пассажирской линии соответственно в летний (зимний) период на ход за один рейс, час.;

$t_{ст}^l, t_{ст}^z$  – время, затрачиваемое СВП на данной пассажирской линии соответственно в летний (зимний) период на посадку-высадку пассажиров и стоянку за один рейс, час.;

$b_x^t, b_{ст}^t, b_{от}^t$  – топливный расход СВП соответственно в ходу и на стоянке, а также работу отопителя, л/час.;

$t_{от}$  – время работы отопителя в пунктах отправления и назначения за один рейс, час.;

$K_T$  – коэффициент увеличения затрат на топливо в зимний период ( $K_T = 1,1$ ).

5. Эксплуатационные затраты управляющей судоходной компании на смазочные материалы в соответствии с периодом эксплуатации:

$$\mathcal{E}_{см}^l = \Pi_{см}^l \cdot m_l \cdot T_{лп}(t_x^l \cdot b_x^{см} + t_{ст}^l \cdot b_{ст}^{см}) ;$$

$$\mathcal{E}_{см}^z = \Pi_{см}^z \cdot m_z \cdot T_{зп}(t_x^z \cdot b_x^{см} + t_{ст}^z \cdot b_{ст}^{см} + t_{от} \cdot b_{от}^{см}) \cdot K_{см} ,$$

где  $\Pi_{см}^l, \Pi_{см}^z$  – цена смазочных материалов соответственно в летний (зимний) период, руб/л;

$b_x^{см}, b_{ст}^{см}, b_{от}^{см}$  – расход смазочных материалов СВП соответственно в ходу и на стоянке, а также работу отопителя, л/час.;

$K_{см}$  – коэффициент увеличения затрат на смазочные материалы в зимний период ( $K_{см} = 1,1$ ).

6. Суммарные расходы на ремонтный фонд и малоценный и быстроизнашивающийся инвентарь:

$$\mathcal{E}_{ри} = \mathcal{E}_{рф} + \mathcal{E}_{мби} = N_c \cdot (P_{рф} + P_{мби}) ,$$

где  $N_c$  – суммарная мощность главных двигателей, л.с.;

$P_{рф}$  – норматив затрат на создание годового ремонтного фонда,  $P_{рф} = 300$  руб/л.с.;

$P_{мби}$  – норматив затрат на малоценный и быстроизнашивающийся инвентарь,  $P_{мби} = 10$  руб/л.с.

При необходимости определения расходов отдельно за летний и зимний период формула может быть преобразована к виду:

$$\mathcal{E}_{ри}^{л(з)} = \frac{\mathcal{E}_{ри}}{365} (T_{лп(зп)} + T_{рр}^{л(з)}) .$$

7. Расходы на управленческий аппарат, накладные расходы, комплексное обслуживание флота, зимний отстой в соответствии с периодом эксплуатации:

$$\mathcal{E}_{ун}^{л(з)} = K_{ун}^{л(з)} \cdot (\mathcal{E}_{лп(зп)} + \mathcal{E}_{рр}^{л(з)} + \mathcal{E}_{бп}^{л(з)} + \mathcal{E}_{сн}^{л(з)} + \mathcal{E}_t^{л(з)} + \mathcal{E}_{см}^{л(з)} + \mathcal{E}_{ри}^{л(з)}) ,$$

где  $K_{ун}^{л(з)}$  – принятый норматив расходов по данной статье, коэффициент, учитывающий отчисления на распорядительно-обслуживающий персонал и др. расходы,  $K_{ун}^{л(з)} = 0,1$ ;

8. Прочие расходы в соответствии с периодом эксплуатации:

$$\mathcal{E}_{пр}^{л(з)} = K_{пр}^{л(з)} \cdot (\mathcal{E}_{лп(зп)} + \mathcal{E}_{рр}^{л(з)} + \mathcal{E}_{бп}^{л(з)} + \mathcal{E}_{сн}^{л(з)} + \mathcal{E}_t^{л(з)} + \mathcal{E}_{см}^{л(з)} + \mathcal{E}_{ри}^{л(з)} + \mathcal{E}_{ун}^{л(з)}) ,$$

где  $K_{пр}^{л(з)}$  – коэффициент, учитывающий размер прочих расходов в соответствии с периодом эксплуатации.

9. Расходы, связанные с уплатой налогов и сборов в соответствии с периодом эксплуатации:

$$\mathcal{E}_{нс}^{л(з)} = K_{нс}^{л(з)} \cdot (\mathcal{E}_{лп(зп)} + \mathcal{E}_{рр}^{л(з)} + \mathcal{E}_{бп}^{л(з)} + \mathcal{E}_{сн}^{л(з)} + \mathcal{E}_t^{л(з)} + \mathcal{E}_{см}^{л(з)} + \mathcal{E}_{ри}^{л(з)} + \mathcal{E}_{ун}^{л(з)} + \mathcal{E}_{пр}^{л(з)}) ,$$

где  $K_{нс}^{л(з)}$  – коэффициент, учитывающий размер расходов, связанных с уплатой налогов и сборов в соответствии с периодом эксплуатации.

Общая величина эксплуатационных расходов составит в соответствии с периодом эксплуатации:

$$\mathcal{E}_{\text{свп}}^{л(з)} = \mathcal{E}_{\text{лп(зп)}} + \mathcal{E}_{\text{рр}}^{л(з)} + \mathcal{E}_{\text{бп}}^{л(з)} + \mathcal{E}_{\text{сн}}^{л(з)} + \mathcal{E}_{\text{т}}^{л(з)} + \mathcal{E}_{\text{см}}^{л(з)} + \mathcal{E}_{\text{ри}}^{л(з)} + \mathcal{E}_{\text{ун}}^{л(з)} + \mathcal{E}_{\text{пр}}^{л(з)} + \mathcal{E}_{\text{нс}}^{л(з)}.$$

Для определения себестоимости перевозки одного пассажира, например, в летний (зимний) период эксплуатации, предлагается использовать следующую формулу:

$$S_{\text{пасс}}^{л(з)} = \frac{\mathcal{E}_{\text{свп}}^{л(з)}}{N_{\text{пасс}}^{л(з)}},$$

где  $N_{\text{пасс}}^{л(з)}$  – количество пассажиров, перевезенных за соответственно в летний (зимний) период навигации, чел.;

$$N_{\text{пасс}}^{л(з)} = P_{\text{свп}} \cdot m_{л(з)} \cdot T_{\text{лп(зп)}},$$

где  $P_{\text{свп}}$  – пассажировместимость эксплуатируемого на данной линии СВП, чел.

При необходимости определения годовой себестоимости перевозки одного пассажира может быть использована формула:

$$S_{\text{пасс}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{свп}}^л + \mathcal{E}_{\text{свп}}^з}{N_{\text{пасс}}^л + N_{\text{пасс}}^з}.$$

Количество судорейсов за одни сутки эксплуатации СВП на внутригородском или пригородном маршруте определяется по формуле:

$$m_{л(з)} = \frac{t_{\text{экс}}^{сл(з)}}{t_{\text{ср}}} = \frac{t_{\text{экс}}^{сл(з)}}{t_x + t_{\text{ст}}},$$

где  $t_{\text{экс}}^{сл(з)}$  - продолжительность эксплуатации СВП за сутки (для летнего навигационного периода и зимнего межнавигационного периода);

$t_{\text{ср}}$  - время одного судорейса ( $t_x + t_{\text{ст}}$ ), ч.;

$t_x$  - время хода судна, ч.

$$t_x = \frac{l_{\text{вп}}}{V_{\text{свп}}},$$

где  $l_{\text{вп}}$  - расстояние маршрута, которое преодолевает СВП, км;

$V_{\text{свп}}$  - средняя скорость СВП на маршруте (с учетом заходов судна в промежуточные пункты маршрута);

$t_{\text{ст}}$  - время стоянки СВП в течение одного рейса на маршруте  $t_{\text{ст}} = t_{\text{ср}} - t_x$ , ч.

#### **Апробация методики**

Для использования на внутригородских и пригородных маршрутах в соответствии с выполненными исследованиями и рекомендациями были выбраны СВП типа «Хивус-10», «Марс-2000», «Хивус-48» [2, 3, 8].

Предлагаемые внутригородские и пригородные маршруты Нижегородского воднотранспортного узла, которые могут быть освоены при круглогодичной перевозке пассажиров СВП, расстояния от речного вокзала города Нижнего Новгорода (принятого центрального пункта всех социальных речных маршрутов) до пунктов назначения, а также расчетная себестоимость перевозок приведены соответственно в табл. 1 и 2.



Таблица 1

**Предлагаемые внутригородские маршруты (г. Н. Новгород) для круглогодичной перевозки пассажиров СВП**

Пункт отправления	Пункт назначения	Расстояние перевозки, км.	Предлагаемый тип судна, пассажиро-местимость, чел.	Расчетная себестоимость, руб./пасс.	
				НП*	МП*
1. Речной вокзал – Стрелка (стадион) – м/р Мецкерское озеро (около автомобильного моста через Волгу – Сормово) и обратно:					
Речной вокзал	Стрелка	2	Хивус – 10 (8-10 пассажиров)	17,06	27,64
	М/р Мецкерское озеро	4		26,32	37,28
	Сормово	7		40,32	50,55
2. Речной вокзал – пл. Ленина – Щербинки – Автозавод – Стригино и обратно:					
Речной вокзал	Пл. Ленина	2	Марс – 2000 (18-20 пассажиров)	16,25	26,07
	Щербинки	12		58,72	70,57
	Автозавод (ул. Фучика)	14		67,23	81,95
	Стригино	18		84,08	98,43

\*Примечание: НП – навигационный (летний) период; МП – межнавигационный (зимний) период.

Таблица 2

**Предлагаемые пригородные маршруты в Нижегородском водотранспортном узле для пригородной перевозки пассажиров СВП**

Пункт отправления	Пункт назначения	Расстояние перевозки, км.	Предлагаемый тип судна, пассажиро-местимость, чел.	Себестоимость, руб./пасс.	
				НП	МП
1. Речной вокзал – пл. Ленина – Автозавод – Дзержинск – Горбатов – Павлово и обратно:					
Речной вокзал	Пл. Ленина	2	Хивус – 48 (48 пассажиров)	8,25	10,84
	Автозавод (ул. Фучика)	14		33,90	38,83
	Дзержинск	46		102,39	116,23
	Горбатов	80		175,00	195,81
	Павлово	115		248,77	278,07
2. Речной вокзал – Стрелка (стадион) – Сормово – Балахна – Заволжье – Городец и обратно:					
Речной вокзал	Стрелка (стадион)	2	Хивус – 48 (48 пассажиров)	8,25	10,84
	Сормово	7		18,44	22,40
	Балахна	33		75,03	84,16
	Заволжье	54		118,64	134,37
	Городец	55		120,96	137,29
3. Речной вокзал – Кстово – Работки – Макарьев – Лысково и обратно:					
Речной вокзал	Кстово	26	Хивус – 48 (48 пассажиров)	60,88	68,53
	Работки	60		131,67	153,04
	Макарьев	89		194,05	217,80
	Лысково	95		205,62	230,93
4. Речной вокзал- Бор – Поселок Октябрьский – Затон Памяти Парижской Коммуны и обратно:					

Речной вокзал	Бор	2	Хивус – 48 (48 пассажиров)	8,25	10,84
	Поселок Октябрьский	15		35,06	42,16
	Затон ШПК	52		115,17	129,34

Как видно из табл. 1, маршруты предлагается организовать с учетом наличия устойчивых пассажиропотоков для внутригородских маршрутов. Тарифы следует устанавливать на уровне себестоимости или ниже, если себестоимость будет заметно выше тарифов (провозной платы пассажира в автобусе) на то или иное расстояние (маршрута). На первом городском маршруте, где расстояния сравнительно наибольшие, целесообразно использовать СВП небольшой пассажироместимости, но с интервалом движения или отправления в 15-20 минут, что соответствует интервалу социальных автобусов.

Начальным пунктом маршрута следует принять речной вокзал, где пассажиры могут обслуживаться в соответствии с требованиями Правил перевозки пассажиров и Правил обслуживания пассажиров. К речному вокзалу и мимо него ведут оживленные автомобильные дороги, поэтому автобусами, в такси и личными автомобилями потенциальные пассажиры могут свободно прибывать со всех нагорных районах города, а также уезжать от вокзала после прибытия на судне. На речном вокзале также можно поместить центральную диспетчерскую для организации движения СВП на всех водных маршрутах, даже офис казенного предприятия типа «Нижегородпассажирречтранс».

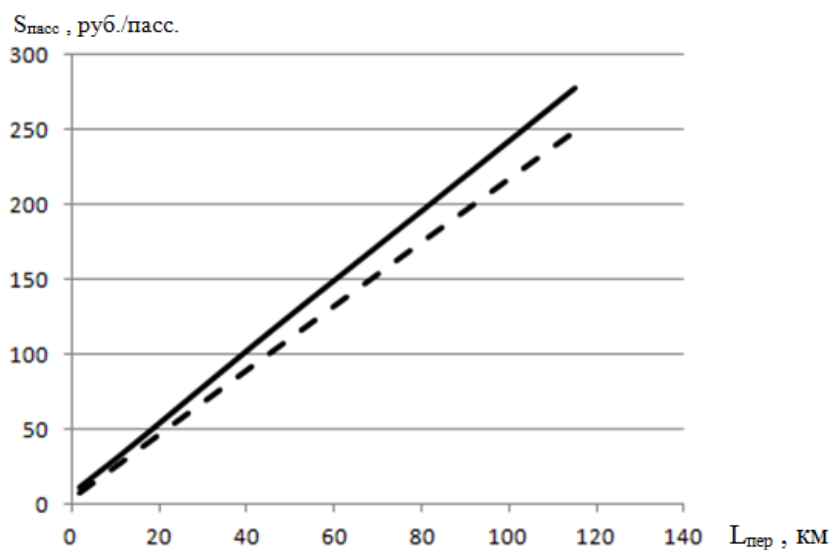
Остановка пл. Ленина является одной из центральных в городе. Здесь недалеко находятся две станции метрополитена «Московская» и «Стрелка», а также железнодорожный и автомобильный вокзалы.

На втором городском маршруте целесообразно использовать СВП пассажироместимостью 18-20 человек, в частности «Марс -2000», а интервал движения или отправления предусматривать 25-30 минут.

Если окажется, что расчетная себестоимость перевозки даже при возможной наполняемости (населенности) судна в 0,6-1,0 значительно выше действующих тарифов на соответствующих городских маршрутах (обычно они одинаковые во всей городской зоне), то следует рассматривать в организационном плане снижение себестоимости перевозки в СВП, изменение расписания их движения или отправления на основании социологических исследований по предполагаемым пассажиропотокам и др.

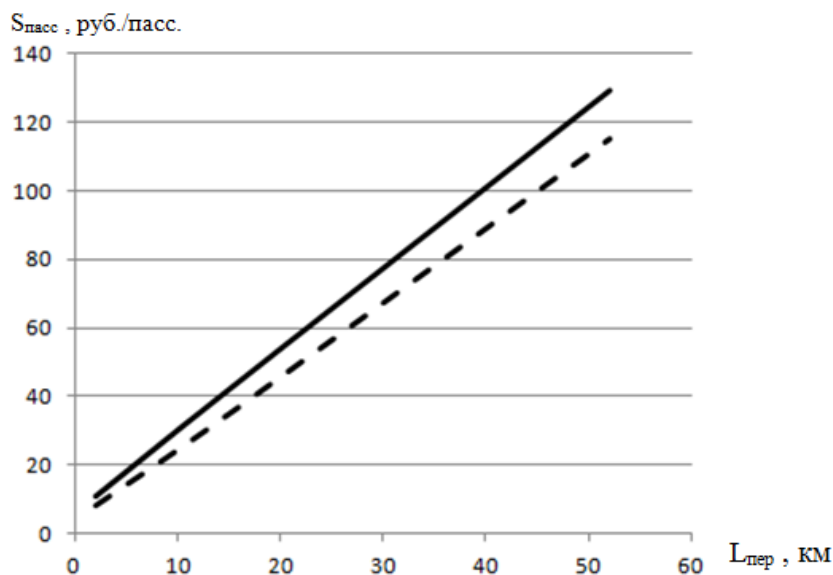
Как видно из табл. 2, предлагается организовать с учетом устойчивых пассажиропотоков четыре пригородных маршрута. Разумеется, могут быть рассмотрены и другие маршруты для круглогодичного использования разных типов СВП.

На рис. 1-2 представлено графическое изображение зависимости себестоимости перевозок пассажиров от расстояния их перевозок на рассматриваемых маршрутах.



--- летний период навигации; — зимний период навигации.

Рис. 1. Зависимость себестоимости перевозок пассажиров ( $S_{пасс}$ ) от их расстояния ( $L_{пер}$ ) в СВП «Хивус-48» на направлении Речной вокзал – Павлово



--- летний период навигации; — зимний период навигации.

Рис. 2. Зависимость себестоимости перевозок пассажиров ( $S_{пасс}$ ) от их расстояния ( $L_{пер}$ ) в СВП «Хивус-48» на направлении Речной вокзал – затон Парк Парижской Коммуны

Указанные зависимости могут быть использованы для обоснования графическим методом себестоимости и тарифов на перевозки для определенных расстояний.

На основании графиков и данных таблицы 2 была выполнена аппроксимация результатов расчетов и определены аналитические выражения для расчета себестоимости перевозки пассажиров в зависимости от расстояния применительно к конкретным маршрутам. Эти зависимости представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Результаты аппроксимации зависимости себестоимости перевозок пассажиров ( $S_{\text{пасс}}$ , руб./пасс) от их расстояния ( $L_{\text{пер}}$ , км) для СВП «Хивус-48» на различных направлениях**

Направление перевозки	Аппроксимирующая формула	
	летний период	зимний период
Речной вокзал – Павлово	$2,1301 \cdot L_{\text{пер}} + 4,1741$	$2,3674 \cdot L_{\text{пер}} + 6,2728$
Речной вокзал – Лысково	$2,1063 \cdot L_{\text{пер}} + 5,8798$	$2,3495 \cdot L_{\text{пер}} + 8,9831$
Речной вокзал – Городец	$2,1298 \cdot L_{\text{пер}} + 3,944$	$2,3835 \cdot L_{\text{пер}} + 5,8305$
Речной вокзал – затон Парк Парижской Коммуны	$2,1443 \cdot L_{\text{пер}} + 3,5082$	$2,367 \cdot L_{\text{пер}} + 6,3397$

Полученные зависимости и аналитические выражения могут существенно упростить работы по проведению расчетов при обосновании затрат и тарифов на перевозки пассажиров СВП.

### Заключение

Определение эксплуатационных расходов за один рейс СВП дает возможность определить себестоимость перевозок одного пассажира в каждом рейсе исходя из наполняемости СВП пассажирами.

Наличие данных по себестоимости перевозок пассажиров на маршруте за рейс при разной наполняемости судна позволяют давать предложения о тарифах за проезд пассажиров в навигационный и межнавигационный периоды.

При конкретной апробации данной методики целесообразно определить изменение себестоимости перевозок пассажиров СВП на маршруте в зависимости от изменения расстояния.

Благодаря представленной методике расчета эксплуатационных затрат и примерам ее апробации при перевозке пассажиров на внутригородских и пригородных маршрутах, становится возможным проведение в жизнь ряда организационных, технических и экономических мероприятий, которое даст возможность существенно (на 25-30%) снизить убытки при перевозке пассажиров, соответственно, уменьшить тарифы, повысив конкурентоспособность использования СВП по сравнению с автобусными маршрутами.

### Список литературы

1. Телегин, А.И., Гончарова Н.В., Юлова А.В. Метод формирования возможных типовых транспортно-логистических схем перевозки пассажира на внутригородских и пригородных маршрутах для определения времени поездки // Научные проблемы водного транспорта. 2020. №63. С. 148-159. Режим доступа: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi63.85>
2. Телегин А.И., Дмитриева А.В. Принципы организации круглогодичной перевозки пассажиров на внутригородских и пригородных маршрутах судами на воздушной подушке // Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек. 2016. №5. Режим доступа: <http://vf-река-море.рф/2016/PDF/65.pdf>.
3. Любимов В.И., Варакосов Ю.Г., Барышев В.И. Техничко-эксплуатационные аспекты использования скоростных судов в транспортной системе Российской Федерации //

- Научные проблемы водного транспорта. 2020. №62. С. 62-70. Режим доступа: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.40>
4. Шалаева Ж.Ю., Домнина О.Л. Перспективы развития туризма в Нижегородской области с использованием скоростного флота // Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек. 2019. №8. Режим доступа: [http://vf-река-море.рф/2019/PDF/11\\_30.pdf](http://vf-река-море.рф/2019/PDF/11_30.pdf). Yatskiv I., Budilovich E., A comprehensive analysis of the planned multimodal public transportation HUB // Transportation Research Procedia. 2017. Vol. 24. Pp. 50-57. DOI:10.1016/j.trpro.2017.05.067
  5. Yatskiv I., Budilovich E., A comprehensive analysis of the planned multimodal public transportation HUB // Transportation Research Procedia. 2017. Vol. 24. Pp. 50-57. DOI:10.1016/j.trpro.2017.05.067
  6. Купальцева Е.В., Роннов Е.П. Математическая модель оптимизации пассажирских судов пригородного и местного сообщения // Вестник ВГАВТ. 2017. №52. С. 100-106.
  7. Минеев В.И., Иванов В.М., Веселов Г.В., Иванов М.В. Концепция экономического обоснования размеров дотирования пассажирских перевозок внутренним водным транспортом // Научные проблемы водного транспорта. 2020. №64. С. 154-163. Режим доступа: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi64.106>
  8. Телегин А.И., Ничипорук А.О., Уртминцев Ю.Н. Методика определения времени и стоимости перемещения пассажира на внутригородских и пригородных маршрутах «от двери до двери» с использованием автобусов или судов на воздушной подушке // Морские интеллектуальные технологии. 2018. №4-2(42). С. 126–130.

#### References

1. Telegin, A.I., Goncharova N.V., Yulova A.V. Metod formirovaniya vozmozhnykh tipovykh transportno-logisticheskikh skhem perevozki passazhira na vnutrigorodskikh i prigorodnykh marshrutakh dlya opredeleniya vremeni poezdki [Method of forming possible standard transport and logistics schemes for transporting a passenger on intra-city and suburban routes to determine the travel time] // Nauchnye problemy vodnogo transporta [Russian Journal of Water Transport]. 2020. No. 63. Pp. 148-159. URL: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi63.85>
2. Telegin A.I., Dmitrieva A.V. Printsipy organizatsii kruglogodichnoi perevozki passazhirov na vnutrigorodskikh i prigorodnykh marshrutakh sudami na vozdushnoi podushke [Principles of organizing year-round transportation of passengers on intracity and suburban routes by hovercraft] // Problemy ispolzovaniya i innovatsionnogo razvitiya vnutrennikh vodnykh putei v basseinakh velikikh rek [Problems of using and innovative development of inland waterways in great river basins]. 2016. No. 5. URL: <http://vf-reka-more.rf/2016/PDF/65.pdf>.
3. Lyubimov V.I., Varakosov YU.G., Baryshev V.I. Tekhniko-ehkspluatatsionnye aspekty ispolzovaniya skorostnykh sudov v transportnoi sisteme Rossiiskoi Federatsii [Technical and operational aspects of the use of high-speed vessels in the transport system of the Russian Federation] // Nauchnye problemy vodnogo transporta [Russian Journal of Water Transport]. 2020. No. 62. Pp. 62-70. URL: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.40>
4. Shalaeva ZH.YU., Domnina O.L. Perspektivy razvitiya turizma v Nizhegorodskoi oblasti s ispolzovaniem skorostnogo flota [Prospects for the development of tourism in the Nizhny Novgorod region using a high-speed fleet] // Problemy ispolzovaniya i innovatsionnogo razvitiya vnutrennikh vodnykh putei v basseinakh velikikh rek [Problems of using and innovative development of inland waterways in great river basins]. 2019. No. 8. URL: [http://vf-reka-more.rf/2019/PDF/11\\_30.pdf](http://vf-reka-more.rf/2019/PDF/11_30.pdf).
5. Yatskiv I., Budilovich E., A comprehensive analysis of the planned multimodal public transportation HUB // Transportation Research Procedia. 2017. Vol. 24. Pp. 50-57. DOI:10.1016/j.trpro.2017.05.067
6. Kupaltseva E.V., Ronnov E.P. Matematicheskaya model optimizatsii passazhirskikh sudov prigorodnogo i mestnogo soobshcheniya [Mathematical model of optimization of suburban and local passenger ships] // Vestnik VГАVТ [VSUWT Bulletin]. 2017. No. 52. Pp. 100-106.

7. Mineev V.I., Ivanov V.M., Veselov G.V., Ivanov M.V. Kontseptsiya ehkonomicheskogo obosnovaniya razmerov dotirovaniya passazhirskikh perevozok vnutrennim vodnym transportom [Concept of economic justification of the amount of subsidies for passenger transportation by inland water transport] // Nauchnye problemy vodnogo transporta [Russian Journal of Water Transport]. 2020. No. 64. Pp. 154-163. URL: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi64.106>
8. Telegin A.I., Nichiporuk A.O., Urtmintsev YU.N. Metodika opredeleniya vremeni i stoimosti peremeshcheniya passazhira na vnutrigorodskikh i prigorodnykh marshrutakh «ot dveri do dveri» s ispolzovaniem avtobusov ili sudov na vozduzhnoi podushke [Procedure for determining the time and cost of passenger movement on intra-city and suburban routes «from door to door» using buses or hovercraft] // Morskie intellektualnye tekhnologii [Marine intelligent technologies]. 2018. No. 4-2(42). Pp. 126–130.

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

**Юлова Анастасия Владимировна**, аспирант кафедры логистики и маркетинга, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: [letter\\_ab@mail.ru](mailto:letter_ab@mail.ru)

**Anastasia V. Yulova**, Graduate Student of the Department of Logistics and Marketing, Volga State University of Water Transport, Nesterova, 5, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: [letter\\_ab@mail.ru](mailto:letter_ab@mail.ru)

**Ничипорук Андрей Олегович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры логистики и маркетинга, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: [nichiporouk@rambler.ru](mailto:nichiporouk@rambler.ru)

**Andrey O. Nichiporuk**, Dr. Sci. (Eng), Assistant Professor, Professor of the Department of Logistics and Marketing, Volga State University of Water Transport, Nesterova, 5, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: [nichiporouk@rambler.ru](mailto:nichiporouk@rambler.ru)

Статья поступила в редакцию 10.05.2022; опубликована онлайн 07.06.2022  
Received 10.05.2022; published online 07.06.2022.

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА,  
СУДОВОЖДЕНИЕ И БЕЗОПАСНОСТЬ СУДОХОДСТВА**

**OPERATION OF WATER TRANSPORT,  
NAVIGATION AND SAFETY OF NAVIGATION**

УДК 659.62

DOI: 10.37890/jwt.vi71.262

**САЕ-исследования аэродинамики речных льдов**

**В.А. Лобанов**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0931-7317>

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

**Аннотация.** В работе проведён обзор осенне-зимних подвижек и торошения льдов на речных судоходных путях. Выделен круг задач обеспечения безопасности ледового судоходства, требующий прогноза ветровых нагрузок на торосистые ледяные поля крупнобитых фракций. В качестве комплексного аргумента для характеристики такого поля предложен коэффициент его парусности. Выявлена статистическая функция распределения высоты торосов.

Для ускорения процесса трёхмерного описания геометрии ледяной поверхности с заданным законом распределения торосов предложено совместное использование САД и САЕ-систем. Проведена серия САЕ-«продувок» модельных ледяных полей. По анализу результатов САЕ-моделирования ветрового воздействия на крупнобитые льды подтверждена зависимость аэродинамических нагрузок от направления атмосферного потока. Сделан вывод об ограниченности применения классического уравнения газодинамики в отношении исследованных льдов.

**Ключевые слова:** ледяной покров, торосистость льда, ветровые подвижки льдов, ледовое сжатие, САЕ-система, численное моделирование.

**CAE studies of river ice cover aerodynamics**

**Vasily A. Lobanov**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0931-7317>

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

**Abstract.** The paper provides an overview of autumn-winter movements and ice hummocking on river shipping routes. The range of tasks of ensuring the safety of ice navigation is allocated, which requires the forecast of wind loads on hummocky ice fields of big fractions. As a complex argument for the characterization of such a field, the coefficient of its windage is proposed. The statistical function of the distribution of the height of the hummocks has been revealed.

To speed up the process of three-dimensional description of the geometry of the ice surface with a given law of the distribution of hummocks, the joint use of CAD and CAE systems is proposed. A series of CAE «purses» of model ice fields has been carried out. The dependence of aerodynamic loads on the direction of atmospheric flow has been confirmed by the analysis of the results of CAE-modeling of wind impact on small floe ices. The

conclusion is made about the limitations of the application of the classical equation of gas dynamics in relation to the studied ice.

**Keywords:** ice cover, ice hummockiness, wind shifts of ice, ice compression, CAE system, numerical modeling.

#### **Введение**

Ледяная среда является дополнительной навигационной опасностью при эксплуатации флота с невысоким уровнем его ледовокатегорийности. Подавляющая часть грузового флота внутреннего и смешанного (река-море) плавания, по объективным причинам эпизодически работающего во льдах, относится именно к этой группе.

Можно констатировать тот факт, что на замерзающих судоходных акваториях наиболее опасным явлением признаны подвижки льдов вследствие течения или ветра. Они провоцируют ледовые сжатия в локальных зонах раздела кинематических или морфологических параметров ледяных образований [1-12]. Ледовые сжатия значительно ухудшают возможности по ледопроеходимости судов, нередко обнуляют их и, как следствие, приводят к повреждениям корпусов и движительно-рулевых органов. Кроме того, практика ледовых навигаций многократными примерами подтвердила губительность этих явлений даже для судов с повышенными ледовыми категориями [2-5].

Уровень ветровых сжатий существенно определяется состоянием внешней поверхности ледовых полей. Поэтому её изучение и математическое описание с целью прогноза места, времени и интенсивности ледовых сжатий сохраняет актуальность [2-7]. Следует указать на то, что традиционные математические модели по аэродинамике льдов дают корректные оценки для очень больших поверхностей (~ сотням квадратных миль). При этом допустимо условное усреднение торосистости этих поверхностей путём введения коэффициента аэродинамического трения, а общий вектор ледового дрейфа считать коллинеарным ветровому воздействию.

Однако в достаточной области задач требуются оценки аэродинамических нагрузок на отдельные ледяные образования значительно большей степени раздробленности. Для условий внутренних водных путей – это крупнобитые льды и обломки ледяных полей. Экспертная оценка результатов, полученных для сопоставимых условий с использованием классических методик, показала неадекватность последних для таких льдов – расхождение в уровнях ветровых нагрузок достигало кратности порядка [3,5,13]. При этом необходим учёт конфигурации льдов в плане и «шероховатости» их поверхности в конкретном направлении ветрового воздействия («продувки»).

Поэтому авторский опыт решения задач аэродинамического воздействия на ледяной покров внутренних водных путей отдаёт предпочтение численным методам. Так, например, САЕ-симуляция подобных процессов обеспечивает вполне корректный отклик по искомым результатам [2,3,10].

#### **Моделирование**

Приведённый ниже обзор явился результатом анализа САЕ-моделирования множества вариантов «продувки» крупнобитых льдов при варьировании их размеров, торосистости, направления и силы ветра. Пример модели показан на рис. 1.



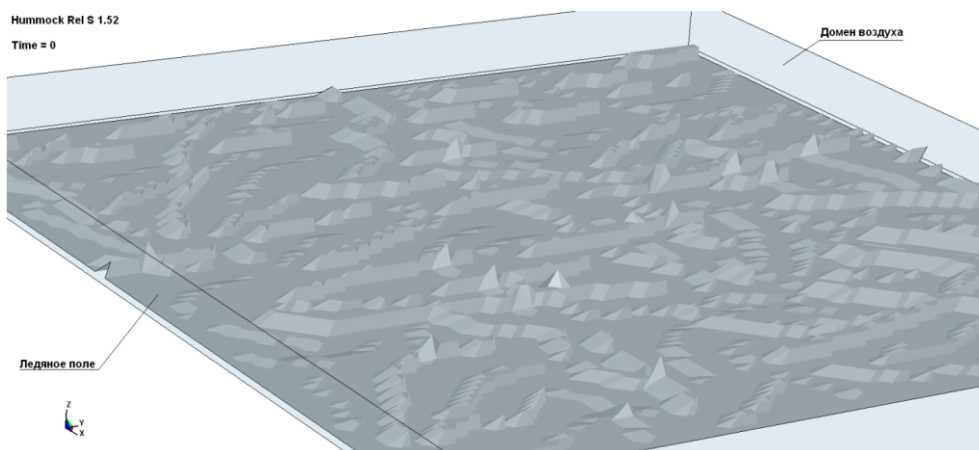


Рис. 1. Пример модели в САЕ-среде

Для снижения временного ресурсопотребления задачи при допущении незначимых ветровых деформаций льда как контактного материала его реология была сформулирована абсолютно жёсткой оболочкой (\*MAT\_RIGID [15]). Взаимодействующая поверхность этой оболочки была помещена внутрь подвижного объёмного домена, имитирующего атмосферу. При этом воздух был описан восьмиузловыми Эйлеровыми элементами. Его реология в используемой САЕ-среде сформулирована моделью \*MAT\_NULL – материалом с нулевыми параметрами девиатора напряжений [15]. Уравнение состояния атмосферы для этого материала допустимо к описанию в нескольких формах. Авторские возможности были ограничены его формулировкой в виде \*EOS\_IDEAL\_GAS [14,16]:

$$p_a = (C_p - C_v)\rho_a T, \tag{1}$$

где  $p_a$  – давление воздуха, Па;

$C_p$ ;  $C_v$  – удельная теплоёмкость воздуха соответственно при постоянных давлении и объёме ( $C_p = 1005 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot^\circ\text{К}}$ ;  $C_v = 718 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot^\circ\text{К}}$ );

$\rho_a$  – плотность воздуха ( $\rho_a = 1,276 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ );

$T$  – абсолютная температура воздуха, °К.

В расчётных моделях изменялась раздробленность ледяной среды (размеры полей: 50-100 м), торосистость ледяных образований (0-5 баллов), сила ветра (0-20 м/с) и его направление (0-180 градусов по азимуту, плоскость XOY, рис. 1). Ресурсопотребление оперативной памяти САЕ-модели по конкретному варианту расчёта зависело от площади ледяного поля и колебалось в интервале потребностей хранения текущих данных для 750 000-1 150 000 узлов.

### Результаты

Постановка настоящей задачи вначале требует описания восторошенного состояния ледяного покрова. По имеющимся публикациям в этой тематике ветровую фрагментацию и торосение протяжённых льдов допустимо свести к поверхности с логнормальным распределением торосов по площади ледяного поля [6,7]. Однако для речных судоходных путей такая модель чаще некорректна по той причине, что торосистые зоны формируются преимущественно вследствие кратковременных

изменений уровней воды в осенне-зимний период, которые провоцируют местные подвижки льда.

Результаты анализа данных рукописи [15] о состоянии поверхности льдов ВВП ЕГС России, дополненных авторскими материалами, убедительно тяготеют к описанию статистического распределения размеров торосов на речных акваториях показательным (экспоненциальным) законом:

$$F_h(h) = 1 - e^{-k_h h}, \quad (2)$$

где  $F_h(h)$  – функция распределения высоты торосов;

$k_h$  – эмпирический коэффициент.

Пример естественного состояния таковой поверхности льда после интенсивного торошения показан на рис. 2, а график функции распределения (2) при  $k = 4$  (торосистость 5 баллов) – на рис. 3.



Рис. 2. Характер торошения льдов внутренних водных путей

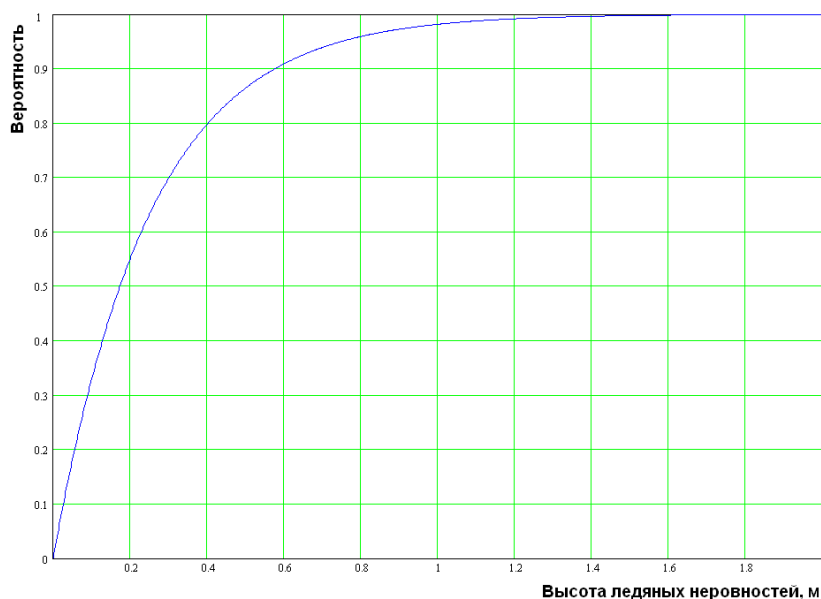


Рис. 3. Функция распределения высоты речных торосов

Кривая функции распределения (Рис. 3) показывает, что с обеспеченностью не менее 95 % взломанные ледяные зоны, сформированные на речных судоходных магистралях после подвижек полей, образованы наслоениями торосов высотой до 0,8 м.

Следует отметить, что торосистость как количественный параметр определяет только соотношение восторженной части и всей площади рассматриваемой ледяной поверхности, то есть высота торосов не является аргументом торосистости. Поэтому эмпирический коэффициент в зависимости (2) должен иметь значение комплексного аргумента. Автором рекомендован коэффициент парусности. Его можно интерпретировать как отношение площадей двух одинаковых в плане ледяных полей – ровного и заторошенного. Например, для торосов высотой 0,20-0,25 м при пятибалльной торосистости ледяного образования его значение составляет около 1,5.

Корректное трёхмерное приближение модели торосистого поля к его естественному состоянию не оправдывает больших затрат времени на подготовку геометрии тела только средствами САЕ-технологий. Дело в том, что в сеточных генераторах САЕ-систем отсутствуют возможности по автоматизированному созданию конечноэлементного разбиения сред с требуемым для пользователя случайным распределением позиций узлов. Это вынудило автора к использованию сторонних математических САД-систем. Так в настоящей работе для описания восторженных ледяных полей был применён пакет MATHCAD [17]. При этом следует отметить, что окончательный этап описания геометрии льда, связанный с переводом координат полученных узлов в «формат» САЕ-системы, выполнялся полуавтоматически. Пример торосистой ледяной поверхности, разработанной с применением MATHCAD-среды показан на рис. 4.

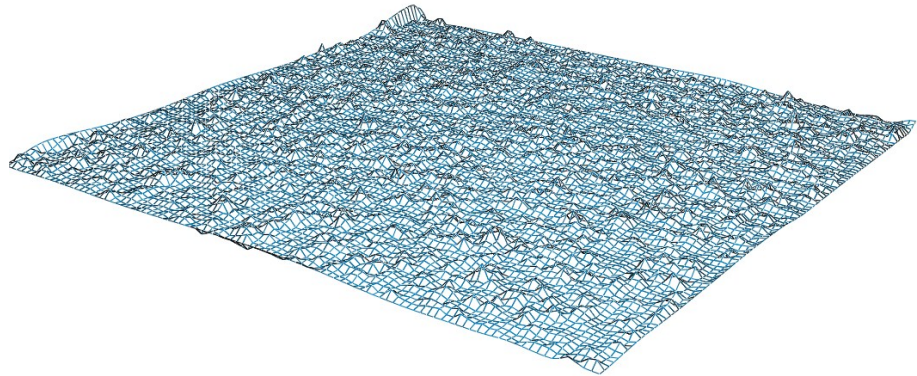


Рис. 4. Вид торосистой поверхности, созданной в MATHCAD-среде

Виртуальные «продувки» исследованных ледяных полей выявили предполагаемую выше зависимость уровня ветровых усилий от направления действия атмосферного потока. Это подтверждают данные САЕ-испытаний, показанные на рис. 5.

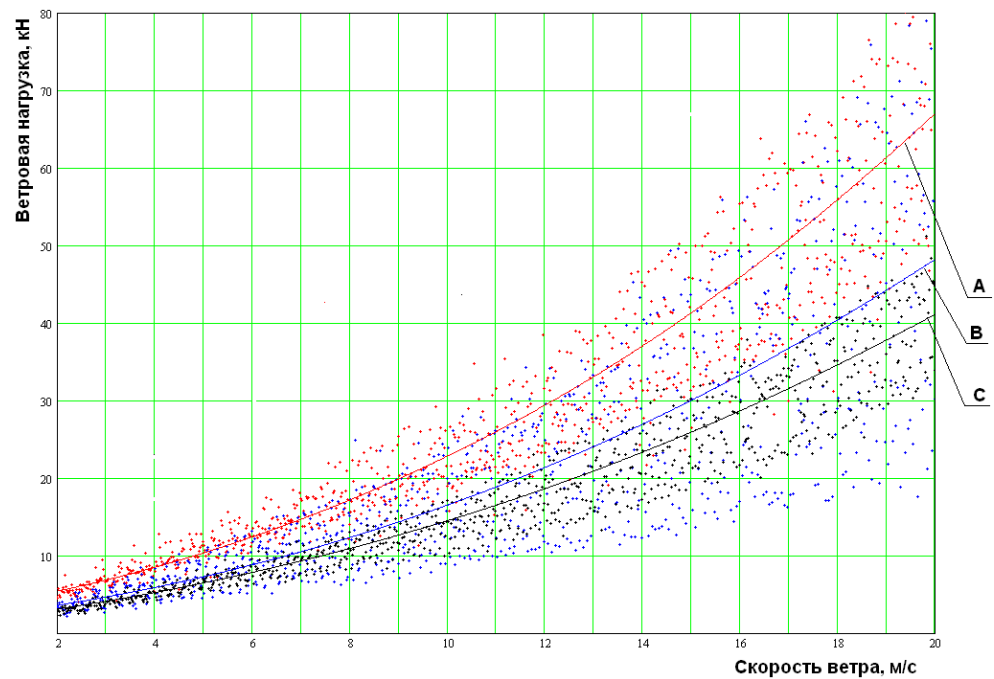


Рис. 5. Зависимость внешних нагрузок на ледяной покров от направления и силы ветра

Графики рис. 5 на примере крупнобитой торосистой льдины (коэффициент парусности – 1,52) средним размером в плане 50 м наглядно иллюстрируют «индивидуальность» каждого варианта (кривые А и В – рост ветровых нагрузок в противонаправленных «продувках», кривая С – для «траверзного» направления ветра

по отношению к условиям А и В). Так при взаимно перпендикулярных «продувках» разница нагрузок может достигать 50 % (линии С и А соответственно).

Поэтому применение известной формулы газодинамики (3) при оценках аэродинамических сил на отдельных ледяных образованиях ограниченных размеров во многих частных случаях не даёт адекватного результата и экспертный подход для решения подобных задач должен быть ориентирован на численные методы:

$$F_a = k_f \rho_a A V_a^2, \tag{3}$$

- где  $F_a$  – аэродинамическая нагрузка;
- $k_f$  – усреднённый коэффициента воздушного трения;
- $A$  – площадь ледяного поля;
- $V_a$  – скорость ветра.

При этом следует отметить, что САЕ-эксперименты по «продувке» исследуемых льдов с их последующей статистической обработкой выявили большую дисперсию коэффициента  $k_f$  (Рис. 6).

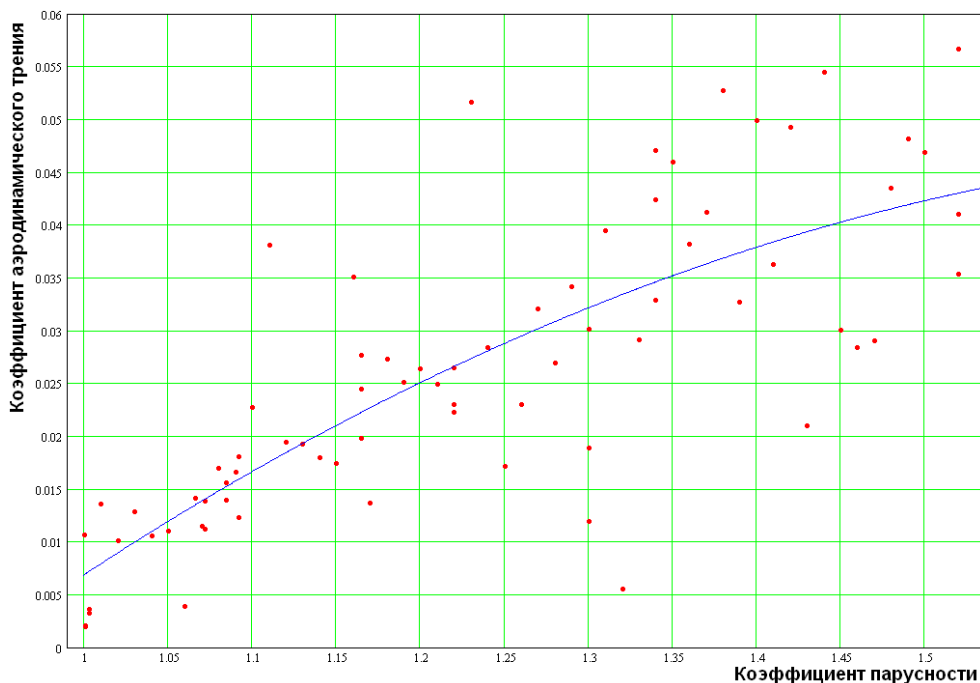


Рис. 6. Статистическая связь коэффициента  $k_f$  с коэффициентом парусности ледяного поля

Для торосистых ледяных полей крупнобитых фракций в исследованном диапазоне их коэффициента парусности разброс величин усреднённого коэффициента воздушного трения при различных направлениях ветра достигает уровня порядка (Рис. 6). И хотя корреляционный анализ обнаружил связь указанных коэффициентов, однако уровень её низок (коэффициент корреляции составил 0,75).

### **Заключение**

1. В достаточном ряде частных случаев адекватные оценки аэродинамических нагрузок на торосистые ледяные поля крупнобитых фракций требуют численного моделирования.
2. Для качественной формулировки влияния торосистости конкретного ледяного образования на его «подверженность» ветровому воздействию предложен коэффициент парусности.
3. Усреднённый коэффициент аэродинамического трения и коэффициент парусности крупнобитых всторошенных льдов слабо коррелированы.

### **Список литературы**

1. Vasily A. Lobanov, Yulia R. Guro-Frolova. Visualization of CAE-Solutions of Ice Navigation Partial Problems. Joint Maneuvering of Vessels (2022). Scientific Visualization 14.1: 32 - 40, DOI: 10.26583/sv.14.1.03
2. Теоретические основы обеспечения безопасности судовождения на внутренних водных путях: монография / А.Н. Клементьев, И.К. Кузьмичёв, В.А. Лобанов [и др.]; под ред. И.К. Кузьмичёва. – Нижний Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2020. – 124 с. – ISBN 978-5901722-73-2. – Текст: непосредственный.
3. Лобанов В.А. Ветровые нагрузки на ледяной покров // Интернет-журнал «Науковедение» Том 7, №2 (2015). – с. 1-11, DOI: 10.15862/64TVN215
4. Ионов Б.П., Грамузов Е.М. Ледовая ходкость судов. 2 издание, исправленное. – СПб.: Судостроение, 2014. – 504 с., ил.
5. Коржавин К.Н. О дрейфе ледяных полей под воздействием ветра. – Материалы симпозиума по льду, 1972. с. 109-112.
6. Миронов Е.У., Клячкин С.В., Порубаев В.С. Морфометрические характеристики гряд торосов и стамух по данным натурных наблюдений и модельных расчетов в северо-западной части Каспийского моря // Труды 9-й межд. конф. RAO'09, 15-18 сентября 2009. – СПб.: 2009. т.1. с. 280–286.
7. Смирнов В.Н., Миронов Е.У. Исследования прочности, морфометрии и динамики льда в инженерных задачах при освоении шельфа в замерзающих морях. – Проблемы Арктики и Антарктики, №2 (85), 2010. – с. 5-15.
8. Aleksei A. Dobrodeev, Kirill E. Sazonov, Elizaveta A. Bokatova. Ice interaction of carrier ships in drifting ice and under ice compression: theoretical description. Proceedings of the 26 th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 14-18, 2021, Moscow, Russia. – URL: POAC21-014.pdf
9. Robert Frederking. Nanisivik Revisited: Ice Pressure Measurements from Winter 1985-86. Proceedings of the 26 th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 14-18, 2021, Moscow, Russia. – URL: POAC21-018.pdf
10. Marnix van den Berg, Raed Lubbad1, Sveinung Løset. Numerical modelling of ice pressure effects on the ice resistance during station keeping in broken ice. Proceedings of the 26 th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 14-18, 2021, Moscow, Russia. – URL: POAC21-082.pdf
11. Dyre Oliver Dammann, Andrew R. Mahoney, Mark Johnson, Hajo Eicken, Leif E.B. Eriksson, Franz J. Meyer, Emily Fedders, Mark Fahnestock. Applications of radar interferometry for measuring ice motion. Proceedings of the 26 th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 14-18, 2021, Moscow, Russia. – URL: POAC21-012.pdf
12. Alisa V. Baranskaya, Nataliya G. Belova, Daria M. Bogatova, Anna V. Novikova, Stanislav A. Ogorodov, Tanghua Li, Timothy A. Shaw, Benjamin P. Horton, Nicole S. Khan. Relative sea level changes as a driver of coastal dynamics in the Russian Arctic. Proceedings of the 26 th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 14-18, 2021, Moscow, Russia. – URL: POAC21-003.pdf

13. Fujisaki A., Yamaguchi H., Toyota T., Futatsudera A., Miyanaga M. Measurements of air ice drag coefficient over the ice covered Sea of Okhotsk. – J. Oceanogr., 2009. №65. – p. 487-498.
14. Botticher R. Fluid Structure Interaction with \*MAT\_SOFT\_TISSUE and EFG Elements. 5th European LS-DYNA Users Conference. – 2005.
15. Тронин В.А. Повышение безопасности и эффективности ледового плавания судов на внутренних водных путях: диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук: специальность 05.22.16 – Судовождение / Горький, 1990. – 414 с.
16. Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA. – URL: <https://www.lstc.com/products/ls-dyna>
17. PTC MathCAD. – URL: <https://www.ptc.com/en/products/MathCAD>

### References

1. Vasiliy A. Lobanov, Yulia R. Guro-Frolova. Visualization of CAE-Solutions of Ice Navigation Partial Problems. Joint Maneuvering of Vessels (2022). Scientific Visualization 14.1: 32 - 40, DOI: 10.26583/sv.14.1.03
2. Teoreticheskie osnovy obespecheniya bezopasnosti sudovozhdeniya na vnutrennih vodnyh putyah: monografiya / A.N. Klement'ev, I.K. Kuz'michyov, V.A. Lobanov [i dr.]; pod. red. I.K. Kuz'michyova. – Nizhnyj Novgorod: Izd-vo FGBOU VO «VGUVT», 2020. – 124 s. – ISBN 978-5901722-73-2. – Tekst: neposredstvennyj.
3. Lobanov V.A. Vetrovye nagruzki na ledyanoj pokrov // Internet-zhurnal «Naukovedenie» Tom 7, №2 (2015). – s. 1-11, DOI: 10.15862/64TVN215
4. Ionov B.P., Gramuzov E.M. Ledovaya hodkost' sudov. 2 izdanie, ispravlennoe. – SPb.: Sudostroenie, 2014. – 504 p. – Tekst: neposredstvennyj.
5. Korzhavin K.N. O drejfe ledyanyh polej pod vozdejstviem vetra. – Materialy simpoziuma po l'du, 1972. c. 109-112.
6. Mironov E.U., Klyachkin S.V., Porubaev V.S. Morfometricheskie karakteristiki gryad torosov i stamuh po dannym naturnyh nablyudenij i model'nyh raschetov v severo-zapadnoj chasti Kaspijskogo morya // Trudy 9-j mezhd. konf. RAO'09, 15-18 sentyabrya 2009. – SPb.: 2009. t.1. s. 280–286.
7. Smirnov V.N., Mironov E.U. Issledovaniya prochnosti, morfometrii i dinamiki l'da v inzhenernyh zadachah pri osvoenii shel'fa v zamerzayushchih moryah. – Problemy Arktiki i Antarktiki, №2 (85), 2010. – s. 5-15.
8. Aleksei A. Dobrodeev, Kirill E. Sazonov, Elizaveta A. Bokatova. Ice interaction of carrier ships in drifting ice and under ice compression: theoretical description. Proceedings of the 26 th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 14-18, 2021, Moscow, Russia. – URL: POAC21-014.pdf
9. Robert Frederking. Nanisivik Revisited: Ice Pressure Measurements from Winter 1985-86. Proceedings of the 26 th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 14-18, 2021, Moscow, Russia. – URL: POAC21-018.pdf
10. Marnix van den Berg, Raed Lubbad1, Sveinung Løset. Numerical modelling of ice pressure effects on the ice resistance during station keeping in broken ice. Proceedings of the 26 th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 14-18, 2021, Moscow, Russia. – URL: POAC21-082.pdf
11. Dyre Oliver Dammann, Andrew R. Mahoney, Mark Johnson, Hajo Eicken, Leif E.B. Eriksson, Franz J. Meyer, Emily Fedders, Mark Fahnestock. Applications of radar interferometry for measuring ice motion. Proceedings of the 26 th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 14-18, 2021, Moscow, Russia. – URL: POAC21-012.pdf
12. Alisa V. Baranskaya, Nataliya G. Belova, Daria M. Bogatova, Anna V. Novikova, Stanislav A. Ogorodov, Tanghua Li, Timothy A. Shaw, Benjamin P. Horton, Nicole S. Khan. Relative sea level changes as a driver of coastal dynamics in the Russian Arctic. Proceedings of the 26 th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 14-18, 2021, Moscow, Russia. – URL: POAC21-003.pdf

13. Fujisaki A., Yamaguchi H., Toyota T., Futatsudera A., Miyanaga M. Measurements of air ice drag coefficient over the ice covered Sea of Okhotsk. – J. Oceanogr., 2009. №65. – p. 487-498.
14. Botticher R. Fluid Structure Interaction with \*MAT\_SOFT\_TISSUE and EFG Elements. 5th European LS-DYNA Users Conference. – 2005.
15. Tronin V.A. Povyshenie bezopasnosti i effektivnosti ledovogo plavaniya sudov na vnutrennih vodnyh putyah: dissertaciya na soiskanie uchyonoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk: special'nost' 05.22.16 – Sudovozhdenie / Gor'kij, 1990. – 414 s.
16. Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA. – URL: <https://www.lstc.com/products/ls-dyna>
17. PTC MathCAD. – URL: <https://www.ptc.com/en/products/MathCAD>

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

**Лобанов Василий Алексеевич**, профессор кафедры Судовождения и безопасности судоходства, доцент, д.т.н., кафедра Судовождения и безопасности судоходства, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603950, Россия, Нижний Новгород, Нестерова 5, e-mail: [lobbas@mail.ru](mailto:lobbas@mail.ru)

**Vasily A. Lobanov**  
Professor of department of Navigation and safety of navigation, associate professor, Dr. Sci. Tech., department of Navigation and safety of navigation; Volga State University of Water Transport, 603950, Russia, Nizhny Novgorod, Nesterova 5

Статья поступила в редакцию 05.05.2022; опубликована онлайн 07.06.2022.  
Received 05.05.2022; published online 07.06.2022.



УДК:681.5:656.62(571.1.6)

DOI: 10.37890/jwt.vi.71.270

## **Инновационные технологии подготовки специалистов по управлению на речном транспорте**

**С.Н. Масленников<sup>1</sup>**

*ORCID: 0000-0002-8419-7749*

**М.Г. Синицын<sup>1</sup>**

*ORCID: 0000-0003-3975-5198*

<sup>1</sup>*Сибирский государственный университет водного транспорта, г. Новосибирск, Россия*

**Аннотация.** Современная среда характеризуется резким ростом информационных потоков, которые необходимо обрабатывать, чтобы идти в ногу с развитием науки и образования. Информационные потоки растут так быстро, что их становится все труднее обрабатывать традиционными методами. Тренажерная подготовка, приближенная к реальным условиям, соответствует требованиям закрепления знаний на основе визуального мышления и отработки навыков принятия решений в оперативном управлении работой флота. Это позволяет закрепить знания и принимать оптимальные управленческие решения.

Такие структуры сохраняются в долговременной памяти и легко достигаются при необходимости, что способствует запоминанию большого количества информации.

**Ключевые слова:** тренажерная подготовка, диспетчер, информационные технологии, внутренний водный транспорт, модель управления транспортными процессам, инновации.

## **Innovative technologies for training specialists in river transport management**

**Sergey N. Maslennikov<sup>1</sup>**

*ORCID: 0000-0002-8419-7749*

**Mikhail G. Sinitsyn<sup>1</sup>**

*ORCID: 0000-0003-3975-5198*

<sup>1</sup>*Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia*

**Abstract.** The modern environment is characterized by a sharp increase in information flows that need to be processed in order to keep up with the development of science and education. Information flows are growing so fast that it is becoming increasingly difficult to process them using traditional methods. Simulator training, close to real conditions, meets the requirements of consolidating knowledge based on visual thinking and practicing decision-making skills in the operational management of the fleet. This allows you to consolidate knowledge and make optimal management decisions.

Such structures are stored in long-term memory and are easily reached if necessary, which contributes to the memorization of a large amount of information.

**Keywords:** simulator training, dispatcher, information technology, inland waterway transport, transport process management model, innovation.

## **Введение**

Все области функционирования общественной деятельности и поведения человека сегодня немислимы без информационных технологий [1]. Это требует изменения и конверсии громадных массивов информации и в информационном сопровождении. Нашли применение информационные технологии и в судовождении. Они направлены на повышение эффективности эксплуатации судов и безопасности судовождения, позволяют принимать оптимальные решения по управлению судами, объектами инфраструктуры и транспортными процессами, особенно в сложных и неопределенных условиях судоходства.

На морском флоте получили развитие и доступность современные информационные судовые и береговые системы, предназначенные для качественного отображения текущей ситуации и обеспечивающие качество управленческих решений. К таким системам относятся: системы автоматической идентификации, электронно-картографические навигационные информационные системы, интегрированные навигационные системы, комплексы радионавигационных приборов, системы управления движением судов, расположенные на берегу, глобальная морская система связи при бедствии и др.

Однако на внутреннем водном транспорте из-за особенностей судоходства и низкой рентабельности перевозок внедрение информационных технологий в управление транспортным процессом лишь недавно получило активное развитие [2]. Определенный прорыв произошел вследствие развития технических средств связи, необходимости обновления навигационного оборудования по требованиям контролирующих органов, доведения навигационного оборудования до требований, необходимых для плавания в морских условиях. В ряде судоходных компаний восточных бассейнов диспетчерское управление работой флота получило развитие за счет спутникового контроля за движением флота и визуализации дислокации флота на электронной карте. Значительное влияние на этот процесс оказала необходимость оперативного контроля за расходом топлива для управления снабжением и эффективным расходом значительных финансовых ресурсов.

Закономерен процесс, когда информационные технологии управления транспортным процессом, применяемые на практике, должны использоваться как средство достижения учебных целей профессионального обучения [3]. Поскольку молодые специалисты после окончания учебного заведения в кратчайший срок должны приступить к управлению транспортным процессом и семь дней в неделю и двадцать четыре часа в сутки будут находиться за диспетчерскими столами, экранами компьютеров, пользуясь справочниками, телефонами, радиосвязью, необходимо предложить адекватное средство обучения [4]. Таким средством должен быть тренажер. На самом деле именно тренажерная подготовка, представляет собой комплекс способов, методов и методик профессиональной подготовки, направленных на создание знаний, умений и навыков обучающихся с помощью оборудования и программных средств [5].

## **Материалы и методы**

Тренажер моделирования транспортных процессов должен быть максимально адекватен изучаемым физическим процессам и технологиям, по интерфейсу отвечать требованиям соответствия управляемому объекту, по методическим возможностям быть эффективным средством обучения и по возможности, простым и надежным в эксплуатации [6]. При всех идеальных качествах тренажера, он все же носит статус вспомогательного и без педагога – инструктора может восприниматься как набор аппаратно-программных средств для обучения персонала. При создании

тренажерного комплекса необходимо опираться на существующие реальные программы, которые уже используются у судоходных компаний. Алгоритм создания тренажера для специалистов по управлению на речном транспорте приведен на рисунке 1.



Рис. 1. Алгоритм создания тренажера для специалистов по управлению на речном транспорте

Модуль должен обеспечивать возможность изучения и отработки следующих функций и профессиональных компетенций диспетчера:

- изучение технологических процессов работы судов и составов;
- движение, формирование состава, технологические операции по пунктам и линейным участкам;
- исследование факторов транспортного процесса перевозки грузов;
- скорость при различных условиях, загрузка, параметры состава, время грузовых и технологических операций;
- приобретение навыков управления работой флота и транспортным процессом путем решения диспетчерских задач;
- регулирование технологических процессов и операций и документирование информации.

Модуль должен обеспечивать возможность:

- хранения, изменения, документирования (в том числе ведение журналов) и отображение всех параметров технологических процессов на

всех рабочих местах. Ведение протокола и статистики, сохранение в БД, обработка результатов тренинга производятся средствами клиент-серверной платформы;

- Запись переговоров, ведущихся между виртуальными АРМ обучающихся;
- проигрывание ранее выполненных сценариев с отображением их на карте и визуализации с одновременным воспроизведением всех переговоров для оценки работы диспетчеров/обучаемых (дебрифинг).

### **Результаты**

Учебный тренажер, реализованный в виде компьютерных рабочих мест не только приближается к реально существующим диспетчерским управления работой флота, оборудованию служб перевозок и движения флота в речных судоходных компаниях, но и позволяет визуализировать транспортный процесс.

Визуализация помогает учащимся учиться, исследователям создавать новые знания, менеджерам и администраторам лучше структурировать и управлять организациями, руководителям – объективно оценивать реальность. Все события отражаются в визуальных образах и вербальных текстах, с помощью которых люди обычно описывают их. Именно смысловое значение событий, созданных силой человеческого воображения, включает в себя индивида, других людей, пространственную среду и временную последовательность событий. Это обстоятельство является основой практических действий по исследованию внешнего мира, в ходе которых исходный образ видоизменяется, удовлетворяя практические потребности. В своем интеллектуальном развитии индивид переходит от грубого смыслового поиска – эмоционально насыщенного и экспрессивного – к действиям по созданию образов. Образ содержит модель мира в ее смысловой форме и предполагает смысловую целостность. Смысловая целостность – это идеальная среда, в которой все предметы, качества и свойства материального мира рассматриваются с определенной точки зрения и интерпретируются на основе практического опыта. Именно тренажерная подготовка является средством максимального приближения практического учебного опыта к компетенциям, необходимым на реальном рабочем месте.

Основной интерфейс автоматизированного рабочего места (далее – АРМ) диспетчера представляет собой аналог реально существующей автоматизированной системы управления транспортными процессами на ВВП (включая карты-схемы, графики, отображения водных путей, объектов инфраструктуры, судов и т.п.). В целях улучшения качества обучения студентов виртуальное АРМ диспетчера максимально приближено к реально действующим диспетчерским системам. Примеры интерфейса существующих АРМ приведены на рисунке 2.

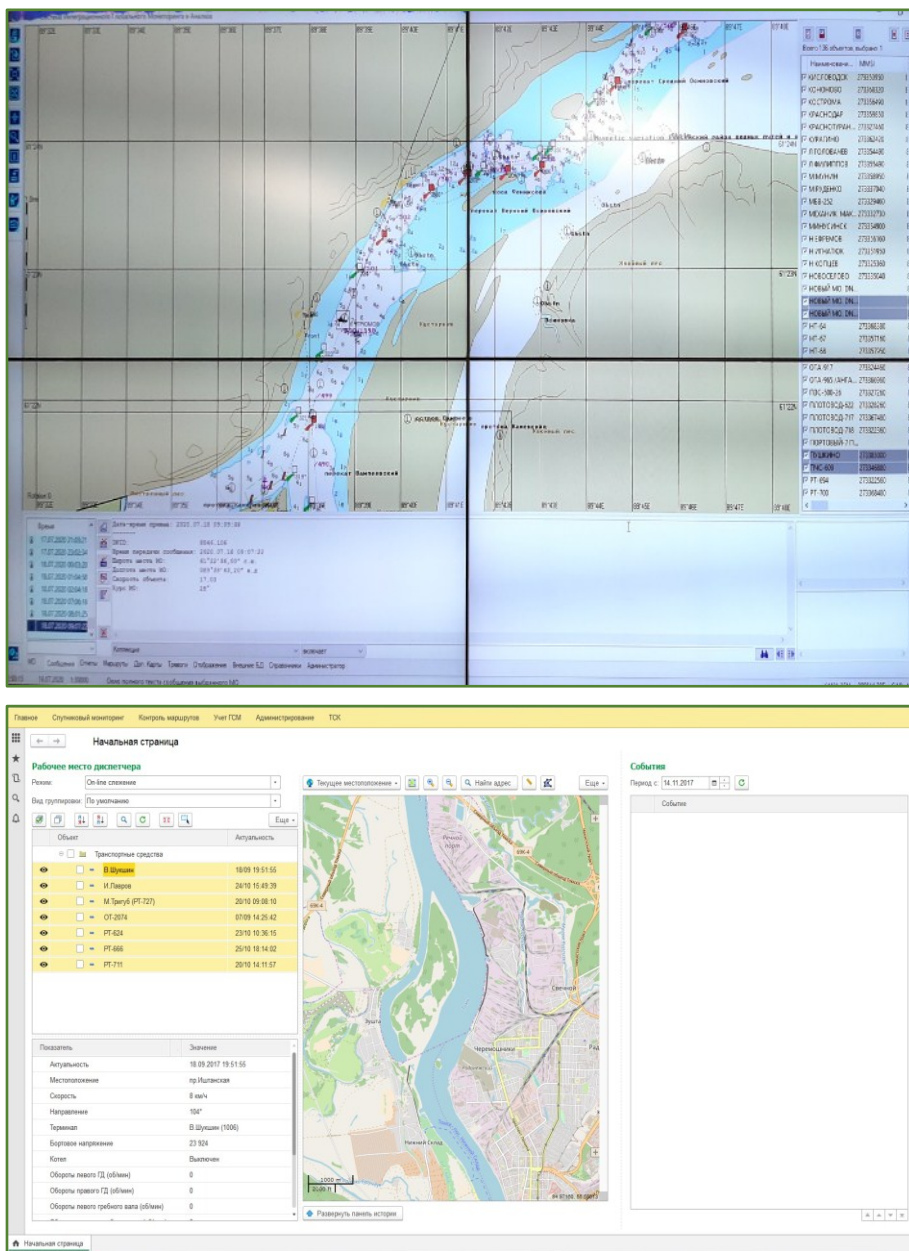


Рис. 2. Пример интерфейса АРМ диспетчера (выше – SIGMA, ниже - 1С Предприятие)

Основным средством визуализации и источником информации об обстановке на линейном участке выступает его интерактивная электронная карта-схема.

Она отображает информацию:

- о состоянии средств береговой и плавучей навигационной обстановки участка ВВП;
- о текущей дислокации флота на водном пути с непосредственным отображением места положения каждой единицы флота;
- о местах расположения портов, шлюзов, мостов и ГЭС;
- о дислокации транспортного, рейдового, служебно-вспомогательного и технического флота.
- Электронная карта-схема обладает следующим функционалом:
- перемещение по карте (скроллинг);
- изменение масштаба обзора (приближение/удаление);
- интерактивное взаимодействие с объектами на карте: вызов контекстного меню, отображение текущей информации об объектах и т.п.

Данные операции выполняются при помощи контекстного меню «Инструменты карты». Каждому обучаемому доступна для просмотра вся карта водотранспортного бассейна, но функции по управлению транспортным процессом ученик может осуществлять только в заданных границах своего линейного участка.

Для отображения текущей информации по объекту на карте необходимо выбрать инструмент «Выбор объекта» в меню «Инструменты карты» и нажать на интересующий объект. При этом появится всплывающее окно информации (рисунок 3).



Рис. 3. Отображение информации на карте-схеме

Рабочий экран диспетчера отображается на двух мониторах персонального компьютера, при этом разделяется на следующие отображаемые области и меню:

Основной монитор включает:

- интерактивную карту-схему;
- панель инструментов;
- список присутствующих на участке судов;
- окно отображения свойств объекта (порта/пристани, судна).

Вспомогательный монитор:

- расписание на участке;
- график движения на линейном участке;
- файлы справочной информации и документации.

Пример интерфейса АРМ диспетчера представлен на рисунке 4.

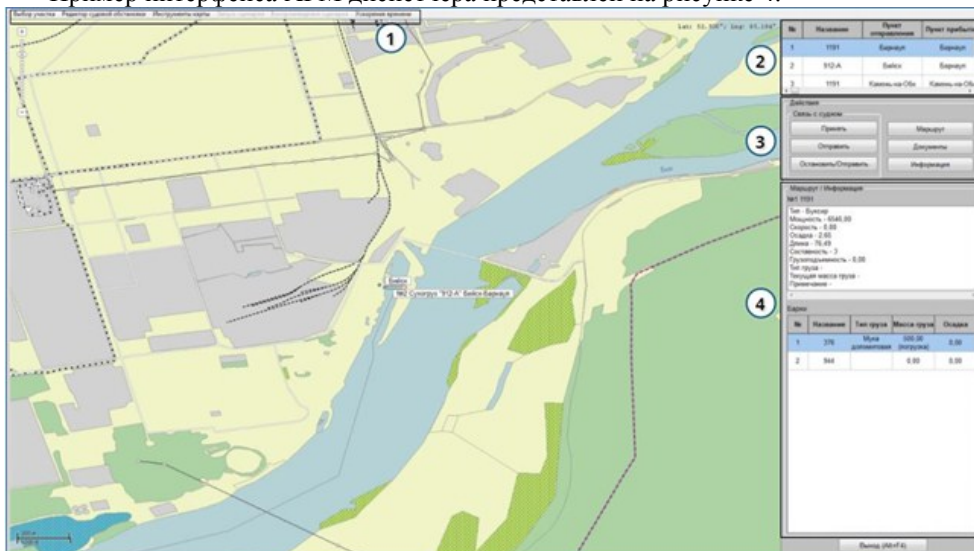


Рис. 4. Интерфейс АРМ диспетчера

Тренажер представляет собой имитацию реально существующего воднотранспортного бассейна внутренних водных путей [7]. Картографическая территория бассейна берется с реальной в масштабе 1:1. При создании тренажера используются актуальные карты бассейна и внутренних водных путей, истинные координаты и названия портов, пристаней, населенных пунктов, шлюзов и прочих гидротехнических сооружений.

Все водные пути пространства тренажера разделены на линейные участки, доступные для диспетчерского контроля. Каждый из участков обладает одним или несколькими портами/пристанями. Виртуальный мир наполнен объектами, влияющими на ход коллективной игры. В качестве объектов могут выступать как единицы флота, так и наземные или водные сооружения.

Управление флотом на определенном линейном участке и деятельность отдельного порта/пристаней (или портов/пристаней) обеспечивается с одного рабочего места диспетчера. Прочие «не занятые» учениками-диспетчерами линейные участки, а также «не занятые» участки в случае обучения группы менее 15 человек, проходятся судами транзитно согласно штатному расписанию.

В рамках реализации береговой инфраструктуры коллективной игры должны быть смоделированы следующие свойства портов/пристаней:

- фактические координаты и наименования порта/причала;
- технологические операции в портах (наименование, время проведения);
- информация об оснащенности порта перегрузочной техникой;
- о готовности причалов и рейдов к приему судов;
- о заявках на обслуживание судов в портах;

- о нормативном, фактическом, прогнозном времени стоянки в портах;
- об услугах комплексного обслуживания;
- о свойствах причалов (размеры и глубины у причала; схемы швартовки; типы грузов и возможность приема опасных грузов; левый/правый берег, местоположение (км пути, координаты)).

Объекты должны отображаться на интерактивной карте-схеме в виде интерактивных областей с названием порта/причала/населенного пункта.

Для выполнения основной задачи диспетчера обучаемому должна быть предоставлена контрольная информация о расписании движения транспорта на вверенном ему участке:

- о регистрации рейсов и фиксации прохождения контрольных пунктов на внутреннем водном пути;
- об учете судо- и грузопотоков;
- о судопотоках и грузопотоках на заданных интервалах времени через заданные точки и на заданных участках пути;
- о нормативном, фактическом, прогнозном времени стоянки в портах;
- о рейсах на водном пути.

Основными задачами для обучаемых являются:

- управление всеми процессами движения судов, постановки к причалам, прохождения шлюзов, мостов и переправ в соответствии с заданным расписанием;
- принятие управленческих решений в нестандартных и аварийных ситуациях.

Тренажер должен иметь возможность сбора, хранения, обработки и вывода статистики по результатам проведения коллективной игры.

Хранение и организация доступа к результатам контроля знаний должны быть персонализированными и включать следующие данные:

- наименование сценария обучения;
- дату и время тестирования;
- протокол действий пользователя с учетом допущенных ошибок;
- общее время на выполнение заданий сценария обучения;
- итоговую оценку.

### **Обсуждение**

Современное общество характеризуется резким увеличением информационных потоков, которые людям необходимо обрабатывать для поддержания прогресса в развитии науки и образования [8]. Объем информации растет так быстро, что люди уже не в состоянии осмыслить объемы числовых или фактических данных и обрабатывать их традиционными методами [9].

Хотя использование визуализации в управлении транспортными процессами растет, в основном визуализируются объекты транспортной инфраструктуры [10]. Основное внимание уделяется визуализации того, как работает созданная модель системы, а не визуализации выходных результатов моделирования.

Учебный тренажер может быть использован для отработки нового подхода, который заключается в визуализации выходных данных сценариев имитационного моделирования.



На основе результатов работы модели одновременно с отображением карты возможно предоставление пользователю следующей информации [11]:

3. Иллюстрация входных и выходных данных моделирования;
4. Одновременное отображение различных сценариев;
5. Отображение имитационной информации на основе связей и маршрутов.

Визуализация графиков, диаграмм облегчает процесс проектирования производственных и экономических показателей.

Основываясь на положительных отзывах, полученных во время презентации инструментария пользователям, мы считаем, что инструментарий тренажерной подготовки способствует улучшению понимания и понимания существа элементов транспортного процесса; заинтересованные стороны и лица, ответственные за принятие решений расширяют их возможности достижения оптимальных результатов [12].

Положение, которое сформировалось сегодня на внутреннем водном транспорте России с тренажерной подготовкой специалистов по управлению движением флота, требует преобразований. Основой этих изменений должны быть информационные технологии и имитационное моделирование транспортного процесса. Такие технологии есть, они уже прошли апробацию и доказали свою эффективность [13].

### **Выводы**

Инновационные технологии повсеместно применяются на предприятиях речного транспорта и позволяют повысить эффективность использования флота, которая проявляется в повышении производительности подвижного состава, снижении затрат и повышении безопасности транспортного процесса [14]. Для подготовки высококлассных специалистов необходимы подобные имитационные модели на базе транспортных вузов. При прохождении производственной практики на транспортных предприятиях у студентов могут возникать трудности при использовании современных программных продуктов; для устранения этих пробелов работодателям приходится проводить дополнительное обучение, что довольно финансово и трудозатратно. При использовании тренажеров по подготовке студентов эта проблема устраняется, и работодатель получает высококлассных специалистов компетентных практически во всех вопросах [15]. Во время проведения лабораторных работ имитируются различные экстремальные ситуации, которые происходят случайно или по причине ошибочных действий обучающихся. Для устранения подобных ситуаций студент должен принять управленческое решение, которое повлияет на дальнейший сценарий. По окончании работы проводится разбор ошибок, которые были допущены и прорабатываются альтернативные варианты. Тренажерная подготовка студентов позволяет обучающемуся получить навыки необходимые на практике, так как функционирование транспортного процесса происходит в условиях риска и неопределенности.

### **Список литературы**

1. Sineglazov, V., Shmelev, J., Simulator training optimization, October 2014, Electronics and Control Systems 1(39), DOI:10.18372/1990-5548.39.7335
2. Britt, L., Addressing Simulation Training, July 2016 Journal of Surgical Education 73(5), DOI:10.1016/j.jsurg.2016.05.007
3. Abelskaya, I., Slobodin, Y., Kaminskaya, T., Koleshko S, Nikonova O, Organization of postgraduate simulation training, March 2020, DOI:10.29235/1818-9857-2020-3-44-47

4. Stoilova, S, Munier, N A Novel Fuzzy SIMUS Multicriteria Decision-Making Method. An Application in Railway Passenger Transport Planning, March 2021 Symmetry 13(3):483, DOI:10.3390/sym13030483
5. Arkhipov, A., Grigoriev, E., Sinitsyn, M. The Northern sea route: A retrospective, strategic solutions and prospects of development // 2020. E3S Web of Conferences Volume 164, 5 May 2020, Номер статьи 11020 DOI: 10.1051/e3sconf/202016411020
6. Qun, M., Jiabing H., Zhengqing X., Xuanhuai, Y., Docker-based Simulation Training System on Dispatching and Control Cloud, May 2019, Conference: 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), DOI:10.1109/ISGT-Asia.2019.8881708
7. Jaiac N., Marović L., Hanák T. Decision Support for Management of Urban Transport Projects. *Gradevinar*, 2015, vol. 67, no. 2, pp. 131–141. doi:10.14256/JCE.1160.2014
8. Máslo, K. (2006). Dynamický model ES pro dispečerský trenažér. Proc. 7th International conference Control of power & heating systems, Zlín (Czech Republic). doi:10.1016/j.ifacol.2016.10.682
9. Синицын М.Г., Ноздрачева Н.В., Синицына М.С. Современные инструменты дистанционного обучения студентов / В сборнике: Методика преподавания математических и естественно-научных дисциплин: современные проблемы и тенденции развития. Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции. Отв. редактор Ю.В. Коваленко. Омск, 2021. С. 78-82.
10. Walkington, C. A. (2013). Using adaptive learning technologies to personalize instruction to student interests: The impact of relevant contexts on performance and learning outcomes. *Journal of Educational Psychology*, 105(4), 932–945. doi: 10.1037/a0031882
11. Michailidou, E., Hampla, A., Simulation training in ICU, October 2020 *IOSR Journal of Dental and Medical Sciences* 19(10):19-22, DOI:10.9790/0853-1910041922
12. Manning D, Simulator Training, April 2017, In book: *Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering*, DOI:10.1002/9781118476406.emoe049
13. Walkington, C., & Sherman, M. (2012, June). Using adaptive learning technologies to personalize instruction: The impact of interest-based scenarios on performance in algebra. Paper presented at 10th International Conference of the Learning Sciences, Sydney, Australia. Sydney, Australia: University of Sydney. doi: 10.13140/2.1.4276.6084
14. Evans, E., P., Hughes, P., Simulation training, January 2012, DOI:10.1017/CBO9780511842153.040
15. Синицын М.Г., Ноздрачева Н.В., Синицына М.С., 3D-модели как инструмент обучения специалистов / В сборнике: Методика преподавания математических и естественно-научных дисциплин: современные проблемы и тенденции развития. Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции. Отв. редактор Ю.В. Коваленко. Омск, 2021. С. 83-86.

#### References

1. Sineglazov, V., Shmelev, J., Simulator training optimization, October 2014, *Electronics and Control Systems* 1(39), DOI:10.18372/1990-5548.39.7335
2. Britt, L., Addressing Simulation Training, July 2016 *Journal of Surgical Education* 73(5), DOI:10.1016/j.jsurg.2016.05.007
3. Abelskaya, I., Slobodin, Y., Kaminskaya, T., Koleshko S, Nikonova O, Organization of postgraduate simulation training, March 2020, DOI:10.29235/1818-9857-2020-3-44-47
4. Stoilova, S, Munier, N A Novel Fuzzy SIMUS Multicriteria Decision-Making Method. An Application in Railway Passenger Transport Planning, March 2021 Symmetry 13(3):483, DOI:10.3390/sym13030483
5. Arkhipov, A., Grigoriev, E., Sinitsyn, M. The Northern sea route: A retrospective, strategic solutions and prospects of development // 2020. E3S Web of Conferences Volume 164, 5 May 2020, Article number 11020 DOI: 10.1051/e3sconf/202016411020
6. Qun, M., Jiabing H., Zhengqing X., Xuanhuai, Y., Docker-based Simulation Training System on Dispatching and Control Cloud, May 2019, Conference: 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), DOI:10.1109/ISGT-Asia.2019.8881708
7. Jaiac N., Marović L., Hanák T. Decision Support for Management of Urban Transport Projects. *Gradevinar*, 2015, vol. 67, no. 2, pp. 131–141. doi:10.14256/JCE.1160.2014

8. Máslo, K. (2006). Dynamický model ES pro dispečerský trenažér. Proc. 7th International conference Control of power & heating systems, Zlín (Czech Republic). doi:10.1016/j.ifacol.2016.10.682
9. Sinitsyn M.G., Nozdracheva N.V., Sinitsyna M.S. Modern tools for distance learning of students / In the collection: Methods of teaching mathematical and natural science disciplines: modern problems and development trends. Materials of the VIII All-Russian Scientific and Practical Conference. Editor Yu.V. Kovalenko. Omsk, 2021. pp. 78-82.
10. Walkington, C. A. (2013). Using adaptive learning technologies to personalize instruction to student interests: The impact of relevant contexts on performance and learning outcomes. *Journal of Educational Psychology*, 105(4), 932–945. doi: 10.1037/a0031882
11. Michailidou, E., Hampla, A., Simulation training in ICU, October 2020 *IOSR Journal of Dental and Medical Sciences* 19(10):19-22, DOI:10.9790/0853-1910041922
12. Manning D, Simulator Training, April 2017, In book: *Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering*, DOI:10.1002/9781118476406.emoe049
13. Walkington, C., & Sherman, M. (2012, June). Using adaptive learning technologies to personalize instruction: The impact of interest-based scenarios on performance in algebra. Paper presented at 10th International Conference of the Learning Sciences, Sydney, Australia. Sydney, Australia: University of Sydney. doi: 10.13140/2.1.4276.6084
14. Evans, E., P., Hughes, P., Simulation training, January 2012, DOI:10.1017/CBO9780511842153.040
15. Sinitsyn M.G., Nozdracheva N.V., Sinitsyna M.S., 3D models as a tool for training specialists / In the collection: Methods of teaching mathematical and natural science disciplines: modern problems and development trends. Materials of the VIII All-Russian Scientific and Practical Conference. Editor Yu.V. Kovalenko. Omsk, 2021. pp. 83-86.

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

**Масленников Сергей Николаевич**, к.т.н., **Sergey N. Maslennikov**, Ph.D. in  
доцент, заведующий кафедрой Управление Engineering Science, Head of the  
работой флота, Сибирский Department of Fleet Operations  
государственный университет водного Management, Siberian State University of  
транспорта) (ФГБОУ ВО «СГУВТ»), Water Transport, 630099, Novosibirsk, st.  
630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, Shchetinkina, 33  
33, e-mail: s.n.m@bk.ru

**Синицын Михаил Геннадьевич**, к.т.н., **Mikhail G. Sinitsyn**, Ph.D. in Engineering  
доцент кафедры Управление работой Science, Associate Professor of the Head of  
флота, Сибирский государственный the Department of Fleet Operations  
университет водного транспорта (ФГБОУ Management, Siberian State University of  
ВО «СГУВТ»), 630099, г. Новосибирск, ул. Water Transport, 630099, Novosibirsk, st.  
Щетинкина, 33, e-mail: Shchetinkina, 33  
mihail\_sinitsyn@mail.ru

Статья поступила в редакцию 23.05.2022; опубликована онлайн 07.06.2022.  
Received 23.05.2022; published online 07.06.2022.

УДК 656.62:330.4  
DOI: 10.37890/jwt.vi71.254

## **Концепция системы оперативного планирования отправления грузов из портов на внутренних водных путях**

**А.Ю. Платов**<sup>1</sup>

*ORCID: 0000-0002-4589-0348*

**Ю.И. Платов**<sup>2</sup>

*ORCID: 0000-0003-1758-1684*

<sup>1</sup>*Нижегородский архитектурно-строительный университет, г. Н.Новгород, Россия*

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

**Аннотация.** Статья посвящена описанию основных информационных и алгоритмических решений, необходимых для реализации системы оперативного планирования отправления грузов речными судами. Существующая в настоящее время концепция системы оперативного планирования касается только отправления судов и составов, то есть такие системы предназначались для использования судовладельцами. Предлагаемая в статье концепция определяет основные черты системы, предназначенной для грузовладельцев. Рассмотрены основные алгоритмы принятия решений, а также необходимая для реализации системы информационная база.

**Ключевые слова:** оперативное планирование, речные перевозки, системы поддержки и принятия решений, план отправления грузов, эксплуатационные затраты, грузовладельцы, судовладельцы, согласование управления.

## **The concept of the operational planning system for the dispatch of goods from ports on inland waterways**

**Alexander J. Platov**<sup>1</sup>

*ORCID: 0000-0002-4589-0348*

**Juri I. Platov**<sup>2</sup>

*ORCID: 0000-0003-1758-1684*

<sup>1</sup>*Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering*

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

**Abstract** The article is devoted to the description of the main informational and algorithmic solutions necessary for the implementation of the operational planning system for the dispatch of goods by river vessels. The current concept of the operational planning system concerns only the ship departure intended for use by ship owners. The concept proposed in the article defines the main features of the system intended for cargo owners. The main decision-making algorithms, as well as the information base necessary for the system operation, are considered.

**Keywords:** operational planning, river shipment, decision support systems, cargo departure plan, operating costs, cargo owners, ship owners, management coordination.

## **Введение**

Основной задачей оперативного планирования отправления грузов в речных судах в условиях как рыночной, так плановой экономики является принятие согласованных решений между грузовладельцами (фрахтователями) и судоводными предприятиями (СП). Предшествующим этапом отправления грузов является выбор назначений судам и составам (ВНС) в пункты отправления. Данной задаче посвящено множество работ, разрабатывающих методы ВНС для условий централизованного управления, например [1, 2]. Для современных условий хозяйствования предлагался метод ВНС в составе непрерывного планирования работы речного флота [3]. При этом инструментом реализации служила интегрирующая имитационная модель.

Однако несмотря на сходство между различными решениями задачи ВНС на методологию выбора решения существенно влияют условия хозяйствования и, в частности, текущее федеральное законодательство (Федеральные законы N 223-ФЗ от 18.07.2011 и N 44-ФЗ от 05.04.2013).

До 2011 г. в качестве ведущего субъекта планирования работы флота выступало СП, назначение судам определялось на основе предварительных заявок на перевозку грузов, а затем план отправок согласовывался при учёте взаимных интересов с грузовладельцами. При этом судовладельцы координировали работу флота между собой, ставя задачу повышения эффективности работы флота. Главными задачами в тех условиях являлись: минимизация порожних пробегов и простоев судов, направленных на снижение непроизводительных расходов и повышение производительности работы флота. Аналогичные цели возможно реализовывать и в настоящее время только в том случае, если грузовладельцы или суда принадлежат единой корпорации, имеющей собственные причалы и управленческие транспортные структуры, например ООО «ЛУКОЙЛ-Транс».

В общем же случае при современном законодательстве план отправления грузов и выбор участников перевозок определяется грузовладельцами на основе тендеров. При этом грузовладельца интересует уменьшение стоимости перевозки за счёт выбора СП с меньшей ставкой фрахта, а также обеспечения качества перевозок грузов, исходя из технического состояния судов. В этом случае дислокация судов и прогноз их прибытия под погрузку для грузовладельца если важен, то только в части уменьшения простоев по его вине и как следствие оплаты демереджа. После выбора СП по объявленным грузовладельцами датам и партиям отправок грузов согласование отправок грузов и формирование графиков подачи судов под погрузку производится чаще всего на период декады и иногда – на месяц. В некоторых случаях согласовываются и графики прибытия гружёных судов, особенно, когда в цепочке перевозки участвует не один судовладелец, а несколько.

В общем случае, если рассматривать технологический процесс перевозок грузов в целом, то в нем участвуют многие субъекты, в том числе причалы как общего пользования, так и принадлежащие отдельным грузовладельцам или зафрахтованные последними (морские накопители). Их взаимодействие в условиях конкуренции сведено к минимуму.

Одновременно повысилась вариантность и снизилась эффективность принятия решений по отправлению грузов и назначению судов. Повышение их эффективности в условиях конкуренции, по нашему мнению, возможно даже исходя из критериев грузоотправителя (фрахтователя) с возможным учётом интересов перевозчиков (судовладельцев). Такое взаимодействие является возможным и продуктивным при применении ИТ. Тем более такая потребность имеется у отдельных крупных грузоотправителей, осуществляющих перевозки водным транспортом.

Можно заметить, что идея интеграции управления на основе автоматизированных систем сама по себе не нова [4]. Но конкретные реализации этой идеи применительно к водному транспорту касаются в основном планирования работы портов [5,6] или управления движением судна [7].

Поэтому реализация системы оперативного планирования отправления грузов на речных судах в виде автоматизированной системы поддержки и принятия решений (СППР) является актуальной проблемой. В данной статье предлагается концепция такой системы для грузоотправителя и его критериев ВНС. Излагаемая концепция предполагает также создание условий для повышения уровня кооперации СП, грузовладельцев, и других субъектов, участвующих в перевозке грузов (согласованное управление).

### **Концептуальный состав информационной базы системы планирования**

Система планирования, реализуемая с помощью ИТ, как и любая информационная система, и в частности, система поддержки и принятия решений (СППР) вообще состоит из ряда обеспечивающих подсистем, к которым относятся, в частности, подсистемы информационного, математического и программного обеспечения [8]. Центральным элементом информационного обеспечения является база данных или информационная база (ИБ).

В состав ИБ системы, ориентированной на грузоотправителя, должны входить данные, в общем аналогичные тем, которые нужны для ИБ системы оперативного планирования работы флота СП.

В этот набор входят группы файлов, разделённых на условно-постоянные (справочные) и оперативные, содержащие входные, промежуточные и выходные данные.

Группа справочных входных файлов содержит информацию о водных путях: графы водных путей; морских и озёрных расстояний; путевых условий; пунктов обработки и проследования; маршрутов плавания.

Файл пунктов обработки и проследования в основном используется для отображения координат судов или узлов транспортной системы (портов, шлюзов) в форму приемлемую для восприятия, то есть привязку к названиям пунктов.

Файл маршрутов плавания содержат сведения о маршрутах плавания по всем рекам и озёрам европейской части РФ, а также по Черному, Азовскому, Средиземному, Балтийскому, Северному морям.

Вторая группа справочных входных файлов содержит информацию о технических и эксплуатационных параметрах грузовых судов: судовых двигателей и котлов; систем подогрева технических параметров проектов барж, толкачей, самоходных грузовых судов и типовых составов.

Файлы, используемые для нормирования, скорости и расхода топлива дополнительно могут содержать также информацию для определения степени обрастания судов при движении на морях, а также среднюю температуру воды и воздуха, необходимую для вычисления расхода топлива на судна и на подогрев высоковязких нефтегрузов.

Третья группа справочных входных файлов содержит данные об узлах транспортной системы и включает в себя описание: шлюзов (ГЭС), затруднительных участков пути, причалов и морских накопителей.

Четвёртая группа справочных входных файлов служит для описания типовых технологических процессов и включает в свой состав характеристики грузов, типовых операций.

Входная оперативная информация складывается из следующих четырех групп файлов.

Первая группа оперативных входных файлов содержит экономические сведения (величины ставок сборов за прохождение ВВП, цене топлива, расходы по содержанию судов и др.).

Вторая группа оперативных входных файлов содержит информацию о текущих путевых условиях и включает в себя: файл текущего расхода воды в ГЭС, файл текущих уровней воды на водомерных постах.

Эта информация используется для пересчёта текущих глубин и течений. При её отсутствии используются усреднённые значения глубин и течений.

Третья группа оперативных файлов содержит сведения о плане отправления грузов, дислокации судов, участвующих в тендере.

Четвертая группа включает сведения об отправления грузов, объявляемых в тендере. Они содержат данные либо в виде корреспонденции грузопотоков каждого рода груза, предназначенных к отправлению, либо график отправления по родам грузов, с указанием величины отправки примерно равной загрузке типового судна и моментов отправления. В первом случае задаётся среднее количество груза для отправки, также с учётом средней загрузки судна, а моменты отправления находятся через средний интервал отправления груза. В этих же данных указывается число причалов погрузки данного рода груза из имеющихся в пункте отправления, При этом число причалов может указываться несколько раз, если они специализируются на погрузке нескольких рядов грузов (специализация указывается в нормативно-справочной информации).

Выходная информация формируется, исходя из потребности пользователя, и содержит как сведения об отправлении грузов и судов и прибытия их в пункты назначения. Также могут рассчитываться различные плановые данные, о работе флота на заданный период.

### **Общее описание методики планирования**

Алгоритм планирования включает в себя три этапа, которые осуществляются последовательными итерациями в диалоговом режиме.

На первом подготовительном этапе при необходимости вносятся изменения условий плавания (глубин судового хода, скорости течений) и продолжительности времени технологических операций, а затем на основе отправления грузов и дислокации судов, участвующих в тендере, формируется динамическая базовая схема использования флота (ДБС) [3]. ДБС представляет собой набор всех оптимальных сочетаний грузопотоков, которые можно получить из плана отправления грузов. В этом наборе исключены встречные порожние пробеги, учтена совместимость перевозки груза в одном судне, районы плавания, габариты пути и др. Дислокация судов, участвующих в тендере выступает, по сути, в роли рабочего ядра флота. При этом из дислокации исключаются суда, которые не обеспечивают должный уровень качества перевозок грузов.

На втором этапе планирования осуществляется прогнозирование работы судов на заданный период. Алгоритм прогнозирования состоит из ряда шагов и на каждом шаге производится отбор судов, которые могут быть включены в план отправлений грузов.

На первом шаге производится прогноз прибытия гружёных судов, отражённых в дислокации, определяются продолжительности всех операций в пункте выгрузки, время движения до пункта погрузки, то есть в итоге моменты прибытия порожних судов в каждый пункт отправления груза в соответствии с ДБС. Суда, момент

прибытия которых оказывается позже заданного периода прогнозирования, исключаются из дальнейшего рассмотрения. Суда, момент прибытия которых раньше заданного периода считаются зарезервированными и рассматриваются на четвёртом этапе в диалоговом режиме.

На втором шаге для всех порожних судов, указанных в дислокации, определяются пункты отправления груза также в соответствии с ДБС и моменты их прибытия под разгрузку. Суда, момент прибытия которых оказывается позже заданного периода, исключаются из дальнейшего рассмотрения. Суда, момент прибытия которых раньше заданного периода также считаются зарезервированными и рассматриваются на четвёртом этапе в диалоговом режиме.

Таким образом, после этих двух шагов в каждом пункте отправления определено множество претендентов (порожних судов) для отправления грузов, и моменты их прибытия под погрузку.

На третьем шаге этапа прогнозирования работы судов производится выбор судов для заявленного к отправлению груза из всех претендентов следующим образом. Для каждой отправки партии каждого рода груза и каждого причала задаются моменты начала и конца так называемых окон прибытия судов. Все суда, моменты прибытия которых находятся вне окон прибытия, далее не рассматриваются.

Из оставшихся судов совместимых с перевозкой данного груза, выбирается судно с минимальным значением фрахта, а если с минимальным фрахтом таких судов несколько, то из них выбирается такое судно, у которого наиболее ранний момент прибытия в рамках окна.

Если в результате отбора претендент, соответствующий этим условиям отправки некоторой партии груза, не находится, то отправка этой партии является неосуществимой.

В случае нахождения претендента определяется загрузка судна и при загрузке меньше массы отправки, остаток от данной отправки присоединяется к следующей отправки. В противном случае загрузка будет равна массе отправки.

В результате последовательного перебора всех отправок по данному пункту погрузки все найденные для отправки суда удаляются из прогноза прибытий других пунктов. Порядок просмотра пунктов отправления принимается от меньшего по массе отправления груза, к большему в соответствии с принципом, изложенным в [2].

На четвёртом шаге информация выдаётся пользователю для анализа и возможной корректировки: моментов и массы отправок, «окон» прибытия судов, а также для назначения зарезервированных судов. Затем второй и третий шаги могут быть повторены. Этот диалоговый процесс может продолжаться до приемлемого результата для грузоотправителя.

На третьем этапе выполняется согласование предварительного плана отправления с судовладельцами (фрахтователями). На этом этапе совместно согласовываются самые различные ситуации: могут быть освоены не все заявки, могут быть не назначенные суда и т.д. Согласование предполагает изменение как дислокации судов (ввод, вывод, сроков аренды судов и т.д.), так и заявок на отправление грузов.

После третьего этапа также могут быть внесены изменения, и тогда второй этап может быть выполнен повторно.

После третьего этапа формируется план отправления грузов, а также выдаётся выходная информация, которая, как было отмечено выше, может быть самой различной, исходя из потребности пользователя.



### **Специальные методы и алгоритмы моделирования**

Изложенный выше подход к планированию является, на наш взгляд, простым и не требует таких сложных алгоритмов моделирования работы флота, которые приведены в [9]. Разработка соответствующего программного обеспечения также представляется несложной, в том числе со стороны организации диалога с пользователем, создания нормативно-справочной информации и т.д.

Однако для обеспечения эффективности предлагаемых решений как в смысле эффективности их реализации, так и в смысле оптимизации работы флота требуется применение проверенных на практике специальных методов и алгоритмов. К ним относится графовая модель водных путей, а также модели оптимизации режима движения судов.

Графовая модель обеспечивает формирование цепочек водных путей следования судна, а также и расстояний между двумя любыми пунктами. Использование такой модели позволяет реализовать эффективные программы для описанных выше алгоритмов.

Из существующих решений, позволяющих описывать внутренние водные пути, можно назвать, например, американский стандарт CSDGM или европейский стандарт Inland ENC. Этими стандартами предусматривается описание профиля русла реки, судового хода и прочих данных, необходимых для навигации.

Однако опыт использования таких подходов для решения задач планирования работы флота следует признать крайне неудачным. Он был получен при разработке тренажёра по управлению флотом для ВГУВТ в 2007 году. Трудоёмкость непосредственного использования обычных географических координат электронных карт оказалась столь значительной, что это иногда делало работу тренажёра невозможной.

Поскольку автоматический съём дислокации в настоящее время осуществляется в географических координатах, то для применения в задаче оперативного планирования отправки груза графовая модель должна быть дополнена достаточно простыми и эффективными алгоритмами пересчёта географических координат в графовые, а если потребуется отображение судна на географической карте, то потребуется обратное преобразование.

Модели расчёта режима движения судна обеспечивают определение скорости движения по каждому элементарном участку водного пути по каждому рейсу (цепочке водного пути), исходя из условий плавания (глубине, ширине, потерь, приращений), эксплуатационных ситуаций, а также индивидуальных характеристик пропульсивного комплекса судна. При расчёте режима всегда выполняется минимизация расхода топлива главными двигателями.

Данная модель необходима для прогноза времени ходовой операции, а также обеспечивает возможность варьирования скоростями движения судна для согласования времени прибытия. Кроме того, при наличии собственного флота у грузовладельцев использование модели оптимизации режима движения позволяет оптимизировать и нормировать расходы на топливо.

### **Обсуждение**

Авторский опыт внедрения и применения различных программ, связанных с рейсовым нормированием и навигационным планированием позволяет утверждать, что внедрение и использование изложенной выше концепции является эффективным как для грузовладельцев, так и судовладельцев. Эффект первых обеспечивается: минимизацией платы за перевозку грузов; снижением рисков оплаты демереджа. У судовладельцев сокращаются простои судов в пунктах погрузки за счёт

регулирования времени прибытия. По тем же причинам обеспечивается экономии расходов на топливо. При существовании обратных грузопотоков последние могут быть учтены, что также снижает эксплуатационные затраты. При этом снижение затрат в результате согласования управления может быть основанием для снижения фрахтовых ставок.

Эффект для грузовладельцев особенно возрастает в случае использования судов различных судовладельцев в тайм-чартере, а также при наличии собственных судов и причалов.

Однако для обеспечения этих эффектов необходимо согласованное взаимодействие для всех участников тендера по разработке и использованию планирования отправления грузов по следующим двум основным направлениям. Во-первых, должна использоваться единая технология сбора информации о дислокации судов разных судоходных предприятий. А, во-вторых, должно быть организовано использование единой нормативно-справочной информации. Другими словами, необходима кооперация между грузовладельцами и несколькими судовладельцами на основе общего информационного пространства.

### **Заключение**

Изложенная концепция оперативного планирования отправления грузов в случае её реализации в виде СППР позволяет повысить эффективность работы грузового флота внутреннего плавания. Практичность и реализуемость этой концепции следует из многолетнего опыта авторов по внедрению близких по назначению СППР в судоходных компаниях «Волготанкер», «Волжское речное пароходство» и других судоходных предприятиях.

### **Список литературы**

1. Ширяев Е.В. К вопросу разработки алгоритма расчёта декадного плана работы флота // Труды ГИИВТ. Горький, 1967. Вып. 84. С. 22-32.
2. Платов Ю.И. Алгоритм выбора назначений судам при оперативном регулировании работы флота // Труды ГИИВТ. Горький, 1983. Вып. 195. С. 3-10.
3. Платов А.Ю., Платов Ю.И. Декомпозиционный подход к выбору назначениям судам при календарном планировании речного флота. Научные проблемы водного транспорта. Вестник ВГАВТ. Выпуск 67. – Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2021. – с. 115-122.
4. Ghiani G., Laporte G., Musmanno R. Introduction to Logistics Systems Planning and Control. Chichester, John Wiley & Sons Ltd, 2004. ISBN 0-470-84916-9
5. Pratap S., Nayak A., Kumar A., Cheikhrouhou N., Tiwari M. An integrated decision support system for berth and ship unloader allocation in bulk material handling port, Computers and Industrial Engineering, 2017, no. 106. pp. 386–399. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.12.009>.
6. I. Castilla-Rodríguez, C. Expósito-Izquierdo, B. Melián-Batista, R.M. Aguilar, J.M. Moreno-Vega. Simulation-optimization for the management of the transshipment operations at maritime container terminals. *Expert Systems with Applications*. 2020, 139, 112852. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.112852>.
7. Huesig, A., Messing S., Lichy-Bittendorf C. WTMS - Waterway Traffic Management System. A System to Optimize Traffic on Island Waterways. Ports Conference, 2001. DOI: 10.1061/40555(2001)126.
8. Смирнова Г.Н., Сорокин А.А., Тельнов Ю.Ф. Проектирование экономических информационных систем: Учебник. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 512 с.

### References

1. Shiryaev E.V. K voprosu razrabotki algoritma rascheta dekadnogo plana raboty flota // Trudy GIIVT. Gor'kii, 1967. Vyp. 84. S. 22-32.
2. Platov YU.I. Algoritm vybora naznachenii sudam pri operativnom regu-lirovanii raboty flota // Trudy GIIVT. Gor'kii, 1983. Vyp. 195. S. 3-10.
3. Platov A.YU., Platov YU.I. Dekompozitsionnyi podkhod k vyboru naznacheniyam sudam pri kalendarnom planirovanii rechnogo flota. Nauchnye problemy vodnogo transporta. Vestnik VGAVT. Vypusk 67. – N. Novgorod: Izd-vo FGBOU VO «VGUVT», 2021. – s. 115-122.
4. Ghiani G., Laporte G., Musmanno R. Introduction to Logistics Systems Plan-ning and Control. Chichester, John Wiley & Sons Ltd, 2004. ISBN 0-470-84916-9
5. Pratap S., Nayak A., Kumar A. Cheikhrouhou N., Tiwari M. An integrated de-cision support system for berth and ship unloader allocation in bulk material handling port, Computers and Industrial Engineering, 2017, no. 106. pp. 386–399. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.12.009>.
6. I. Castilla-Rodríguez, C. Expósito-Izquierdo, B. Melián-Batista, R.M. Aguilar, J.M. Moreno-Vega. Simulation-optimization for the management of the transshipment operations at maritime container terminals. Expert Systems with Applications. 2020, 139, 112852. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.112852>.
7. Huesig, A., Messing S., Lichy-Bittendorf C. WTMS - Waterway Traffic Man-agement System. A System to Optimize Traffic on Island Waterways. Ports Conference, 2001. DOI: 10.1061/40555(2001)126.
8. Smirnova G.N., Sorokin A.A., Tel'nov YU.F. Proektirovanie ehkonomicheskikh informatsionnykh sistem: Uchebnik. – M.: Finansy i statistika, 2003. – 512 s.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Платов Александр Юрьевич**, д.т.н., доцент, зав. кафедрой прикладной информатики и статистики, Нижегородский архитектурно-строительный университет (ФГОУ ВО «ННГАСУ»), 603950, Н.Новгород, ул. Ильинская, 65, e-mail: [platofff@mail.ru](mailto:platofff@mail.ru)

**Alexander J. Platov**, Dr. Sci. Tech, head of Applied Informatics and Statistic Chair, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 603950, Nizhny Novgorod, Ilyinskaya st., 65

**Платов Юрий Иванович**, д.т.н., проф., профессор кафедры управления транспортом, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: [platov\\_ji@mail.ru](mailto:platov_ji@mail.ru)

**Juri I. Platov**, Dr. Sci. Tech, professor of Transport Management Chair, Volga State University of Water Transport, 603951, Nizhny Novgorod, Nesterova st., 5

Статья поступила в редакцию 18.04.2022; опубликована онлайн 07.06.2022.  
Received 18.04.2022; published online 07.06.2022.

УДК 629.12.001.2  
DOI: 10.37890/jwt.vi71.268

## **Определение параметров качки судна в эксплуатационном рейсе**

**В.П. Умрихин**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1164-7857>

«Сибирский государственный университет водного транспорта», г. Новосибирск, Россия

**Аннотация.** В данной статье предлагается использовать созданный на базе микроконтроллерной техники аппаратно-программный комплекс для записи и визуализации параметров качки судна в эксплуатационном рейсе. Возможность непрерывной записи параметров килевой и бортовой качки судна в различных погодных условиях и изменяющейся загрузки судна позволяют оперативно отслеживать параметры остойчивости и повысить безопасность судовождения в сложных метеоусловиях штормового плавания. Записанный в MS EXCEL трек с параметрами качки и текущим временем позволяет сопоставить время записи с действием различных гидрометеорологических условий, учитывающих как ветровое, так и волновое воздействие на судно, в том числе и от гидрометеорологических объектов, находящихся на значительном расстоянии от текущего положения судна. Эти данные позволяют осуществить гармонический анализ качки, получить частотный спектр, фазово-частотные характеристики, собственный период качки и амплитудно-частотную характеристику судна.

**Ключевые слова:** килевая и бортовая качка судна, запись и визуализация параметров качки судна в эксплуатационном рейсе.

## **Determination of the ship pitching parameters during an operational voyage**

**Viktor P. Umrikhin**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1164-7857>

*Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia*

**Abstract.** In this article, it is proposed to use a hardware and software complex created on the basis of microcontroller technology to record and visualize the parameters of the ship pitching during an operational voyage. The ability to continuously record the parameters of pitching and rolling of the vessel in various weather conditions and the changing loading of the vessel allows you to quickly monitor the stability parameters and improve the safety of navigation in difficult weather conditions of stormy navigation.

The track recorded in MS EXCEL with the pitching parameters and the current time allows you to compare the recording time with the effect of various hydrometeorological conditions, taking into account both wind and wave effects on the vessel, including the effect from hydrometeorological objects located at a considerable distance from the current position of the vessel. These data make it possible to carry out a harmonic analysis of pitching, to obtain the frequency spectrum, phase-frequency characteristics, proper pitching period and amplitude-frequency characteristics of the vessel.

**Keywords:** pitching and rolling of the vessel, recording and visualization of the parameters of the pitching of the vessel in the operational voyage.

## Введение

Одной из наиболее важных задач, обеспечивающих безопасность плавания, является постоянный контроль устойчивости судна при движении его в штормовых условиях. Решение этого вопроса позволяет предотвратить попадание судна в зоны резонансной качки, уменьшить влияние слеминга, брочинга и, кроме этого, оптимизировать курс судна при его движении в неблагоприятных погодных условиях. Для решения всех этих задач необходимо оперативное знание всех параметров качки судна в эксплуатационном рейсе, в котором изменяется загрузка судна с учётом естественного использования топлива, воды и других факторов. Для реализации этой задачи необходимо определять параметры качки судна по принципу "здесь и сейчас". Кроме этого, необходимо иметь запись параметров качки по всему треку следования судна для возможности анализа и получения дополнительных параметров, например, амплитудно-частотной характеристики судна при его движении на нерегулярном волнении. Предлагаемый аппаратно-программный комплекс позволяет решить все эти вопросы.

## Методы

### Аппаратная часть

Для создания устройства регистрации качки с дискретной записью параметров качки в компьютер непосредственно в эксплуатационном рейсе при фактической загрузке судна была выбрана платформа Arduino Uno R3, выполненная на базе микроконтроллера ATmega328p с тактовой частотой 16МГц, памятью 32 КБ и 20 контролируемыми контактами ввода и вывода для взаимодействия с внешним миром [1].

Для обеспечения подключения датчиков без дополнительной пайки через стандартные трехпроводные шлейфы и дальнейшего функционального расширения возможностей устройства использовалась плата расширения Troyka Shield [1].

Для получения данных использовался IMU-сенсор 10-DOF v2 на 10 степеней свободы. IMU – от английского Inertial Measurement Unit — инерционное измерительное устройство для определения положения устройства в пространстве.

Общая характеристика модуля и устройств, необходимых для решения задачи выглядят следующим образом.

**Сенсор** предназначен для работы по интерфейсу I<sup>2</sup>C (Inter-Integrated Circuit) – последовательная асимметричная шина для связи между интегральными схемами внутри электронных приборов, используемая для низкоскоростной (до 100 кбит/с) или высокоскоростной (400 кбит/с) передачи 8-битных данных между микроконтроллерами, датчиками, оперативным запоминающим устройством и т.д. Для передачи информации используется всего две двунаправленные линии связи SDA - линия данных, SCL - линия синхронизации. Шина разработана фирмой Philips, но с 1 октября 2006 года отменены лицензионные отчисления за использование протокола I<sup>2</sup>C. Контакты на плате D – сигнальный (линия данных SDA), C – сигнальный (линия тактирования шины SCL), V – питание сенсора (3,3-5В), G – общая земля.

**Акселерометр.** Трёхосевой акселерометр LIS331DLH показывает ускорение относительно собственных осей X, Y и Z. Это помогает определить направление к центру Земли. Имеет следующие характеристики:

- Диапазон измерений:  $\pm 2 / \pm 4 / \pm 8$  g.
- Максимальная чувствительность:  $9,8 \times 10^{-3}$  м/с<sup>2</sup>.
- I<sup>2</sup>C-адрес:

- без переключки: 0x18;
- с переключкой: 0x19.

Гироскоп. Гироскоп I3G4250D с характеристиками:

- Диапазон измерений:  $\pm 250 / \pm 500 / \pm 2000$  град/сек.
- Максимальная чувствительность:  $8,7 \times 10^{-3}$  град/сек.
- I<sup>2</sup>C-адрес:
- без переключки: 0x68;
- с переключкой: 0x69.

Все микросхемы разработаны фирмой STMicroelectronics и оснащены температурной компенсацией для работы в экстремальных условиях.

Соединение сенсора с платой осуществлялось по шлейфу Dupont Female-Female.

Соединение устройства с компьютером осуществлялось по стандартному кабелю USB (A — B).

Для удобства использования устройство было помещено в бокс Arduino. Габаритные размеры устройства 110\*60\*35мм, вес без USB-кабеля 103 грамма (рис.1).



Рис. 1. Устройство для измерения и записи качки судна в сборе

### **Программная часть**

Для использования данного устройства разработка программного обеспечения была разбита на несколько частей:

1. Разработка прошивки для данного устройства.
2. Написание программного обеспечения для пользователя, т.е. создание клиентской части программы с удобным интерфейсом, позволяющим в реальном времени отслеживать параметры качки судна и осуществлять запись в файл для дальнейшей обработки полученных данных.
3. Автоматизация обработки записанных данных.

### **Разработка прошивки для устройства**

Разработка прошивки для устройства осуществлялась на языке C++ в пакете Visual Studio 2015 Community – это бесплатная, интегрированная среда разработки для создания приложений под Windows, Android, iOS, а также web-приложений. С ее помощью можно выполнять сборку приложений для любой платформы. В одном инструменте объединены конструкторы, редакторы, отладчики и профилировщики. Есть доступ к тысячам расширений и многому другому.

Файл прошивки в виде блок-схемы приведен на рис.2. Базовые файлы библиотек для устройства были взяты из [2], остальная часть программного кода принадлежит автору.

Включение фильтра Калмана в прошивку устройства объясняется большими помехами при измерениях с помощью микроконтроллерной техники [3], [4].



Рис. 2. Блок-схема файла прошивки устройства

#### Программное обеспечение для пользователя

Написание программного обеспечения для пользователя осуществлялось на языке C# в пакете Visual Studio 2015 Community. При создании программного обеспечения необходимо было решить несколько задач:

1. Возможность для пользователя подключения устройства к любому USB-порту.
2. Передача данных от устройства в приложение, которое условно назовем Клиент.
3. Осуществление записи показателей прибора в выбранный пользователем файл в любое доступное место на компьютере.

4. Визуализация параметров качки для того, чтобы вахтенный помощник, несущий ходовую навигационную вахту, видел углы крена и дифферента судна в режиме здесь и сейчас.

Общий вид интерфейса Клиент представлен на рис. 3

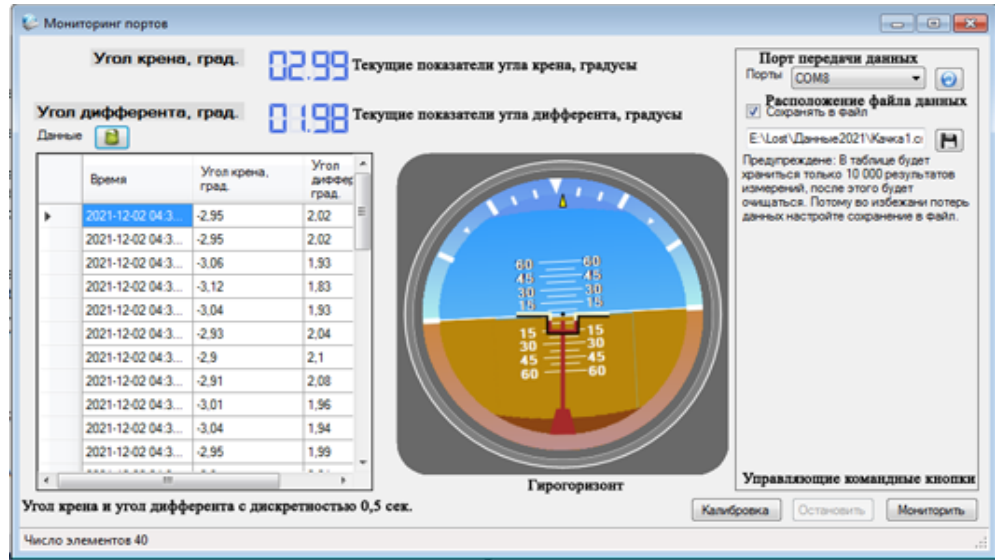


Рис. 3. Общий вид интерфейса Клиент

Сам Клиент состоит практически из четырех проектов (рис. 4):

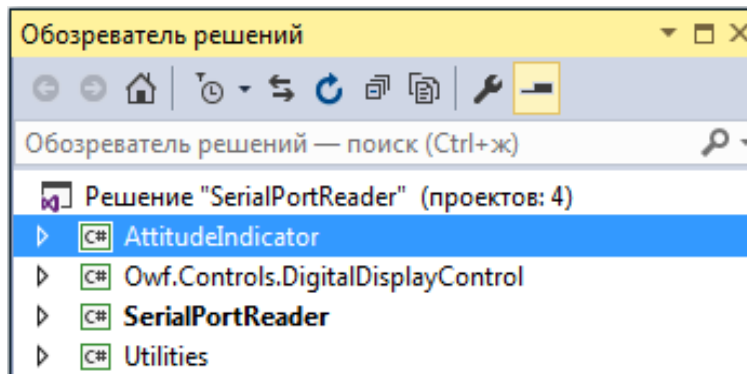


Рис. 4. Структура Клиента

5. AttitudeIndicator – Индикатор Ориентации, который назовём условно Гирогоризонт. Часть кода, касающаяся графики, заимствована из [5], все процедуры, касающиеся синхронизации датчика с созданным графическим объектом и параллельной передачи информации во все элементы окна приложения Клиент авторские.
6. Owf.Controls.DigitalDisplayControl – блок, позволяющий выводить текущие углы крена и дифферента в градусах в цифровом виде в верхней части окна Клиент.



7. SerialPortReader – блок предназначен для синхронизации работы других блоков, выбора порта приёма данных для устройства, записи поступающих данных в окно Клиента и в файл на компьютере на выбранный диск с указанием имени файла и его положения (папки). Запись осуществляется в файл Microsoft Excel с расширением .scv, что позволяет упростить дальнейший анализ имеющихся данных.
8. Utilities – из самого названия следует, что это утилиты, которые используются программными модулями по мере необходимости.

#### **Тарировка прибора и оценка точности получаемой информации**

Для тарировки прибора и оценки точности полученных результатов использовался модернизированный секстан. Для проведения эксперимента потребовался поверочный стенд, обладающий высокой точностью измерения углов. Такой стенд был собран вручную, основой стенда и гарантом его точности стал навигационный морской секстан СНО Т, обладающий возможностью снимать углы до 0,1 угловой минуты — это меньше 0,01 градуса, остальными частями стенда являются: стойка фиксатор секстана и кронштейн для крепления электронного датчика автоматического регистратора параметров качки судна (рисунок 5). Создание стенда и проведение эксперимента осуществлялось коллективом авторов: Сичкарев В.И., Бабич С.И., Дьячков Л.В., Умрихин В. П.

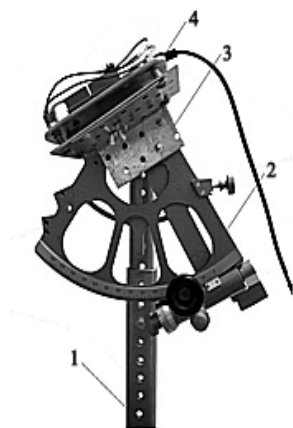


Рис. 5. Сборный поверочный стенд для автоматического регистратора параметров качки судна

На рисунке обозначено:

- 1 – стойка фиксатор секстана;
- 2 – секстан СНО Т;
- 3 – кронштейн;
- 4 – автоматический регистратор параметров качки судна (АРПКС)

При использовании стенда необходимо учитывать особенность градуировки шкал на лимбе секстана, где два угловых градуса равняются одному истинному угловому градусу [6], [7].

Единственной погрешностью в проведении апробации являлась инструментальная погрешность секстана в среднем не превышающая 20 угловых секунд с учётом возможной кривизны зеркал, так как в качестве стенда зеркала секстана не использовались можно утверждать, что инструментальная поправка была

ниже среднего значения. В силу ничтожности величины инструментальной поправки, она не учитывалась, а показания отчётно-стопорного устройства секстана принимались за истинные величины.

Первоначально были выявлены систематические ошибки, которые возникают из особенностей изготовления прибора, а именно крепления датчика гироскопа и акселерометра, который должен быть закреплен точно в плоскости Гирогоризонта. Платформа выставлялась по лазерному уровню в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях, что позволило устранить неточности монтажа датчика. Общий вид поверочного стенда показан на рис. 6.



Рис. 6. Общий вид поверочного стенда для автоматического регистратора параметров качки судна

Эксперимент проходил следующим образом. Отсчет секстана выставляется на отметку 131°, что соответствует углу наклона 33°. Далее с помощью ПО в течение 10 – 15 секунд снимается не менее 20 показаний датчика, эти показания усредняются. Затем отсчёт секстана уменьшается на 2 градуса, что будет соответствовать изменению угла наклона на 1 градус. Повторяются измерения и результаты вносятся в таблицу, результаты которой представлены на рис.7 и рис.8. После выполнения измерений для одной оси датчик поворачивается на 90°, чтобы была возможность снять показания для другой оси. Для каждого измерения угла рассчитывается погрешность измерения по формуле (1) для крена и формуле (2) для дифферента:

$$\Delta \theta_{\text{изм.}} = \theta_{\text{факт.}} - \theta_{\text{изм.}} \quad (1)$$

$$\Delta d_{\text{изм.}} = d_{\text{факт.}} - d_{\text{изм.}} \quad (2)$$

Из приведенных на рис. 7 и рис. 8 графиков видно, что погрешность прибора при измерениях углов крена до  $\pm 15^{\circ}$  не превышает сотых долей градуса, а при больших углах погрешность не превышает  $0,25^{\circ}$ . При измерении углов дифферента ошибка прибора не превышает десятых долей градуса. В практической навигации предположить, что угол дифферента судна будет превышать  $\pm 30^{\circ}$  достаточно сложно, хотя и при таких углах погрешность не превосходит значений  $\pm 0,6^{\circ}$ .

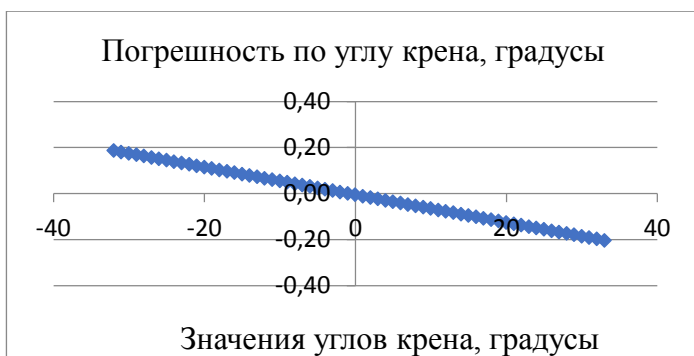


Рис. 7. Погрешность прибора по углу крена в градусах

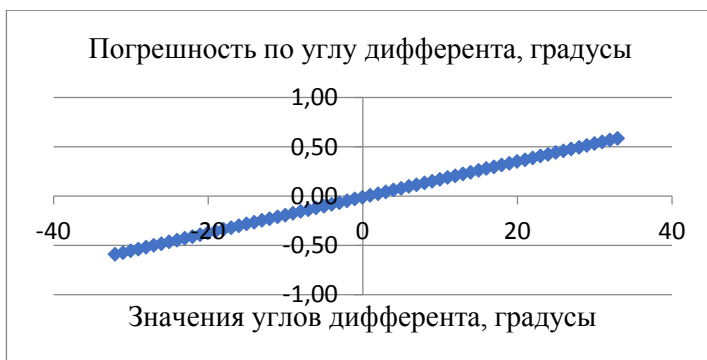


Рис. 8. Погрешность прибора по углу дифферента в градусах

Исходя из полученных результатов, можно считать, что прибор выдаёт достоверную информацию о параметрах бортовой и килевой качки судна.

### Результаты

#### Вид записи данных с прибора в файл для обработки

После выбора порта передачи данных в окне Клиента (см. рис. 3) и задания месторасположения и имени файла устройство запускается с помощью командной кнопки «Мониторить». При этом синхронно начинает выдаваться текущая информация по крену и дифференту в числовом виде в левом верхнем углу, цифровая информация в виде таблицы, осуществляется запись в файл с указанным именем и в указанную папку в формате \*.csv. Формат csv в переводе с английского Comma-Separated Values – это текстовый формат, который представляет собой табличные данные. Простыми словами, данный формат работает в Excel, где строки соответствуют тексту, в которых содержатся поля разделенные запятыми. Фрагмент записи в файл представлен в таблице 1.

Таблица 1

Фрагмент файла с данными в формате .csv

Datetime	Angle roll	Angle trim	Angle turn	Gyro x	Gyro y	Gyro z	Accel x	Accel y	Accel z
02.12.2021 16:07	-2,6	2,07	-18,6	-0,11	0,27	-0,17	-0,42	0,34	-9,93
02.12.2021 16:07	-2,5	2,17	-18,59	-0,53	0,11	-0,2	-0,39	0,44	-9,85
02.12.2021 16:07	-2,46	2,15	-18,39	-0,3	-0,1	-0,11	-0,38	0,41	-9,84
02.12.2021 16:07	-2,54	2,1	-18,55	-0,55	-0,07	-0,06	-0,48	0,32	-9,93
02.12.2021 16:07	-2,62	2,04	-18,65	-0,52	0,06	-0,12	-0,33	0,37	-9,92
02.12.2021 16:07	-2,51	2,05	-18,23	-0,65	0,28	-0,02	-0,35	0,41	-9,86
02.12.2021 16:07	-2,44	2,07	-18,03	-0,15	1,99	0,01	-0,47	0,38	-9,89
02.12.2021 16:07	-2,4	2,13	-18,03	-0,42	0,03	-0,3	-0,48	0,31	-9,99
02.12.2021 16:07	-2,49	2,11	-18,31	-0,37	-0,1	0,06	-0,48	0,36	-9,86
02.12.2021 16:07	-2,63	1,98	-18,47	-0,45	0,11	0,01	-0,5	0,37	-9,9
02.12.2021 16:07	-2,61	1,96	-18,32	-0,56	0,31	-0,08	-0,48	0,3	-9,93
02.12.2021 16:07	-2,53	2,01	-18,16	-0,31	0,31	-0,16	-0,36	0,4	-9,98
02.12.2021 16:07	-2,45	2,09	-18,11	-0,67	-0,05	0,01	-0,35	0,43	-9,81
02.12.2021 16:07	-2,51	2,04	-18,24	-0,49	0,15	-0,04	-0,53	0,3	-9,95
02.12.2021 16:07	-2,63	1,97	-18,47	-0,39	0,16	0,11	-0,39	0,33	-9,93
02.12.2021 16:07	-2,62	1,97	-18,41	-0,23	0,52	-0,04	-0,37	0,42	-9,88

Datetime – это текущее время, которое соответствует системному времени компьютера, к которому подключен датчик в формате полной даты. Запись в таком формате позволяет при дальнейшей обработке синхронизировать полученные значения с местоположением судна и гидрометеорологическими условиями в данном месте и в данное время.

Angleroll – угол крена в градусах.

Angletrim – угол дифферента в градусах.

Angleturn – угол рыскания (не обрабатывался).

Gyrox, Gyroy, Gyroz – угловая скорость вокруг осей x,y,z.

Accelx, Accely, Accelz – ускорения относительно осей x,y,z.

В таблице зарезервированы два столбца reserved\_1, reserved\_2 для возможности выдачи дополнительных данных и столбец measure\_count, показывающий количество

измерений в пачке данных. Указанные столбцы в таблице 1 отсутствуют для её сокращения.

### **Обсуждение**

Наиболее сложную задачу представляет полный анализ гидрометеорологической обстановки, способной создать волнение, достигающее в виде зыби до района плавания судна ко времени записи качки. Так, например, зыбь, формируемая циклонами северной Атлантики, отстоящими от района плавания от 1,5 до 3 тысяч миль, влияет на волновую картину в районе плавания судна. На преодоление этого расстояния, с учётом скорости распространения достаточно длинных волн, требуется более двух суток. Располагая картами приземного анализа, по барическому полю можно определить область, в которой направление ветра, генерирующего волнение, будет распространяться приблизительно к району плавания судна. Коническая проекция карт приземного анализа не обладает свойствами равноугольности и равновеликости, поэтому прямая на них не является кратчайшим расстоянием между двумя точками, а направление этой прямой может отличаться от геодезической линии на несколько градусов. Не очень простым является и характер взаимодействия различных волновых структур.

### **Заключение**

По итогам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

- создан прибор для измерений параметров бортовой и килевой качки непосредственно в эксплуатационном рейсе;
- написано программное обеспечение для прошивки устройства и пользовательский интерфейс для визуализации и записи параметров килевой и бортовой качки судна в файл на жесткий диск компьютера при подключении устройства через USB-порт. Порт подключения, место сохранения файла и его имя выбираются пользователем;
- данные, записанные в файл, позволяют осуществить обработку характеристик качки и получить дополнительные данные по поведению судна при его движении на волнении, включая амплитудно-частотную характеристику судна.

### **Благодарности**

Автор выражает благодарность заведующему кафедрой Судовождения ФГБОУ ВО «СГУВТ» профессору Сичкареву Виктору Ивановичу за общее руководство при выполнении работы, аспирантам Бабичу Сергею Игоревичу и Дьячкову Леониду Владимировичу в работе по проведению тарировки прибора.

### **Список литературы**

1. <https://amperka.ru/product/arduino-uno#docs> (электронный ресурс).
2. <https://www.arduino.cc/en/Guide/Libraries> (электронный ресурс).
3. Балакришнан А.В. Теория фильтрации Калмана. М.: Мир, 1988. 168 с.
4. <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/kalman-filter-library/> (электронный ресурс).
5. Густафсон Г.Г. Анимированные элементы управления с использованием графических слоев. <https://www.codeproject.com/Articles/879500/Animated-Controls-using-graphic-layers> (электронный ресурс).

6. Бабич С.И., Солюянов Е.В., Дьячков Л.В. Измерения поправок высот секстана с поворотным большим зеркалом. Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока, № 3,4. 2016. – Новосибирск: СГУВТ, 2016. – с. 74- 78.
7. Сичкарёв В.И. Вспомогательные операции мореходной астрономии: учебное пособие / В.И. Сичкарёв. – Новосибирск: Изд-во НГАВТ, 2012. – 131 с.

#### References

1. <https://amperka.ru/product/arduino-uno#docs> (ehlektronnyi resurs).
2. <https://www.arduino.cc/en/Guide/Libraries> (ehlektronnyi resurs).
3. Balakrishnan A.V. Teoriya fil'tratsii Kalmana. M.: Mir, 1988. 168 s.
4. <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/kalman-filter-library/>(ehlektronnyi resurs).
5. Gustafson G.G. Animirovannye ehlementy upravleniya s ispol'zovaniem graficheskikh sloev. <https://www.codeproject.com/Articles/879500/Animated-Controls-using-graphic-layers> (ehlektronnyi resurs).
6. Babich S.I., Soluyanov E.V, D'yachkov L.V. Izmereniya popravok vysot sekstana s povorotnym bol'shim zerkalom. Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka, № 3,4. 2016. – Novosibirsk: SGUVT, 2016. – s. 74- 78.
7. Sichkarev V.I. Vspomogatel'nye operatsii morekhodnoi astronomii: uchebnoe posobie / V.I. Sichkarev. – Novosibirsk: Izd-vo NGAVT, 2012. – 131 s.

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

**Умрихин Виктор Павлович**, к.т.н., доцент, доцент кафедры высшей математики и информатики, Сибирский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «СГУВТ»), 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: umrvic@mail.ru

**Viktor P. Umrikhin**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics and Computer Science, Siberian State University of Water Transport, 630099, Novosibirsk, Shchetinkina str., 33, e-mail: umrvic@mail.ru

Статья поступила в редакцию 23.05.2022; опубликована онлайн 07.06.2022.  
Received 23.05.2022; published online 07.06.2022.

## **ВОДНЫЕ ПУТИ, ПОРТЫ И ГИДРОТИХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ**

УДК 627.4

DOI: 10.37890/jwt.vi71.257

### **Мероприятия по снижению негативного воздействия на гидрологические и судоходные условия реки при разработке руслового карьера выправительными сооружениями**

**В.В. Агеева<sup>1</sup>**

ORCID: 0000-0002-1124-2203

**Е.А. Люкина<sup>1</sup>**

ORCID: 0000-0002-7116-0824

**М.А. Матюгин<sup>2</sup>**

ORCID: 0000-0002-9446-0352

<sup>1</sup>*Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, г. Нижний Новгород, Россия*

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

**Аннотация.** Устройство карьеров на реках (в особенности на судоходных) требует ряд дополнительных обоснований, поскольку разработка участка недр влияет на гидрологический режим и условия судоходства. В работе проведена подробная оценка влияния разработки предполагаемого участка недр на гидрологические и судоходные условия реки Белая при различных вариантах отработки полезного ископаемого, которая показала недопустимость работ без введения ряда ограничений и проведения дополнительных природоохранных мероприятий. В качестве таких мероприятий в процессе выполнения работ по добыче предлагается строительство выправительных сооружений (полузапруд). В рамках исследований проведен анализ влияния предполагаемой добычи на структуру потока русла при строительстве предлагаемых полузапруд и без них, который показал значительное уменьшение негативного влияния разработки карьера на рассматриваемый участок реки Белой.

**Ключевые слова:** русловой карьер, гидрологический режим реки, судоходный режим реки, посадка уровня воды, деформация русла, интегральная кривая расходов, планы течений, полузапруды, выправительные сооружения, граничные условия, моделирование речного потока.

### **Measures to reduce the negative impact on the hydrological and navigational conditions of the river during the development of a channel quarry by correctional facilities**

**Vera V. Ageeva<sup>1</sup>**

ORCID: 0000-0002-1124-2203

**Ekaterina A. Lyukina<sup>1</sup>**

ORCID: 0000-0002-7116-0824

**Mikhail A. Matyugin<sup>2</sup>**

ORCID: 0000-0002-9446-0352

<sup>1</sup>*Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russia*

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

**Abstract.** The arrangement of quarries on rivers (especially on navigable) requires a number of additional justifications, since the subsoil section development affects the hydrological regime and shipping conditions. The work carried out a detailed assessment of proposed subsoil area development on the hydrological and navigational conditions of the Belaya River in various mining options, which showed the inadmissibility of work without introducing a number of restrictions and additional environmental measures. As such measures, the construction of corrective structures (barrage) is proposed in the performing mining work process. As part of the research, an analysis of proposed production the impact on the channel flow structure during the construction of the proposed semi-dams and without them was carried out, which showed a significant decrease in the quarry development negative impact on the section of the Belaya River under consideration.

**Keywords:** riverbed quarry, the river hydrological regime, the river navigable regime, water level landing, riverbed deformation, integral discharge curve, plans of currents, barrage, straightening structures, boundary conditions, modeling of the river stream.

### **Введение**

Строительство автодорог в настоящий момент является одним из приоритетных направлений развития транспортной инфраструктуры Российской Федерации. В своем послании Федеральному Собранию от 21.04.2021 г. [1] Президент Российской Федерации Владимир Владимирович Путин озвучил необходимость продления строящейся скоростной автомагистрали Москва – Казань до Екатеринбурга. При этом обозначил весьма короткие сроки завершения этого проекта в три года. Строительство автомагистрали внесено в Транспортную стратегию Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года, утвержденную Распоряжением Правительства РФ от 27.11.2021 № 3363-р [2]. Створ проектируемой автомагистрали расположили в Бураевском районе Республики Башкортостан со строительством мостового перехода через р. Белую в районе 1939 км судового хода [3].

Реализация данной программы требует обеспечения строительства автомагистрали качественными материалами, в т.ч. нерудными строительными материалами (НСМ) (песком, песчано–гравийным материалом (ПГМ), гравием). С этой целью в акватории реки Белой предлагается размещение нового карьера, что требует дополнительного обоснования с точки зрения обеспечения условий безопасности судоходства и оценки степени негативного воздействия на гидрологические условия участка реки.

Рассматриваемый потенциальный карьер расположен в муниципальном районе Бураевский Республики Башкортостан, в 30 км юго–западнее р.д. Бураево, вблизи с. Вострецово (рис. 1), в русле р. Белой между перекатами Верхнеказанцевский и Среднеказанцевский (рис. 2).

Водный режим на рассматриваемом участке реки Белая – типичный для равнинных рек восточноевропейского типа: обычно с одновершинным весенним половодьем и довольно устойчивым ходом уровней в летний и зимний периоды. Необходимые сведения о гидрологическом режиме реки (о расходах, уровнях, ледоставе) были взяты по гидрологическим постам (г/п) и водомерным постам (в/п) «Уфа», «Бирск» и «Андреевка». Ход среднемноголетних уровней воды по наблюдениям на водомерных постах «Уфа», «Бирск» и «Андреевка» представлен на совмещенном графике (рис. 3). Отметка проектного уровня (ПУ) воды в районе расположения участка недр составляет 67,8 м БС.





В рамках настоящего исследования оценены последствия и предложены варианты по снижению негативного воздействия разработки карьера на гидрологический режим и условия судоходства на данном участке. Данные исследования проведены согласно требованиям действующего законодательства и имеющейся нормативно-технической базы, кроме того, был учтен опыт предыдущих исследований [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18].

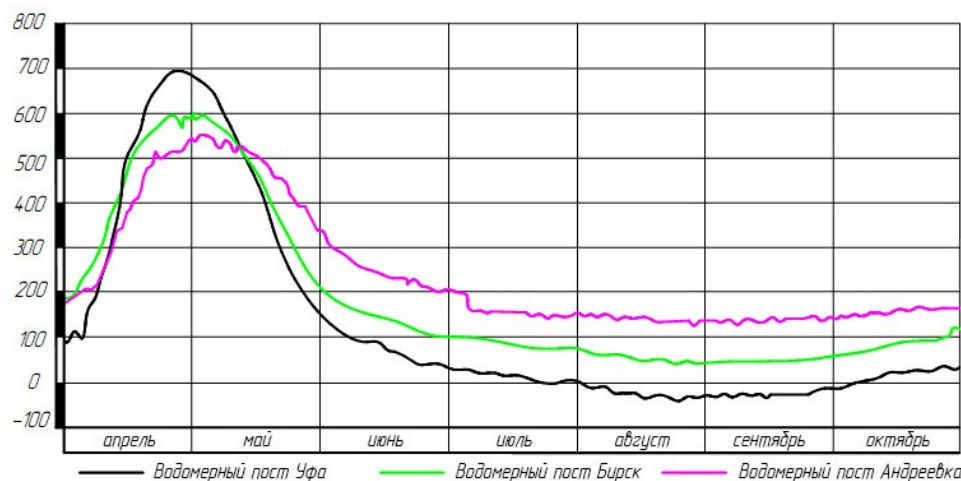


Рис. 3. Совмещенный график среднегодовых уровней воды по наблюдениям на гидрологических постах «Уфа», «Бирск» и «Андреевка»

### **Оценка влияния разработки участка недр на гидрологический режим и условия судоходства.**

С целью определения возможности проведения работ по добыче и их объемов были проведены гидравлические расчеты возможной посадки уровня воды при разработке карьера НСМ. Расчеты проведены по методике, изложенной в [4, 6], в основе которой лежат следующие положения: движение потока воды в реке считается установившимся; русло реки относительно долговременный период считается стабильным и не деформируется; движение потока воды в русле реки описывается системой дифференциальных уравнений движения.

Результаты гидравлических расчетов посадки уровня воды показали, что:

- при разработке ПГМ в объеме 50 тыс. м<sup>3</sup> (глубина разработки до 10 м от ПУ) посадка уровня составит не более 1,7 см;
- при разработке ПГМ в объеме 250 тыс. м<sup>3</sup> (глубина разработки до 10 м от ПУ) посадка уровня составит не более 6,4 см;
- при полной одновременной разработке всего участка недр (глубина разработки до 10 м от ПУ) посадка уровня составит 18,8 см.

Оценка многолетних деформаций русла на исследуемом участке проводилась по результатам проведенных русловых съемок за период с 2012 по 2017 гг., по которым также был построен совмещенный план (рис. 4).

Проведенный анализ показал, что исследуемый участок имеет сложную форму и включает в себя побочный тип русловых деформаций в верхней части, свободное меандрирование в нижней. Исследуемый участок представлен тремя перекатами: Верхне-, Средне- и Нижнеказанцевским.

На верхнем участке (верхняя плесовая лощина Верхнеказанцевского переката) наблюдается размыв дна с расширением полосы судового хода на 100 м, вместе с тем намывается правый берег на протяжении 800 м.

Нижележащий плес до Среднеказанцевского переката протяженностью 3 км так же представляет собой прямолинейный участок шириной около 350 м и глубиной 2 м. Между Верхне- и Среднеказанцевскими перекатами проявляется притяжное течение. Ближе Среднеказанцевскому перекату река отходит от левой бровки. На правом берегу расположен побочень, обеспечивший данному участку относительную устойчивость. С 2012 г. на всем анализируемом участке преобладал размыв как берегов, так и проектных изобат. В результате этого к настоящему времени этот правый побочень представляет собой песчано-гравелистую косу протяженностью в 1 км, которая играет роль струенаправляющей дамбы.

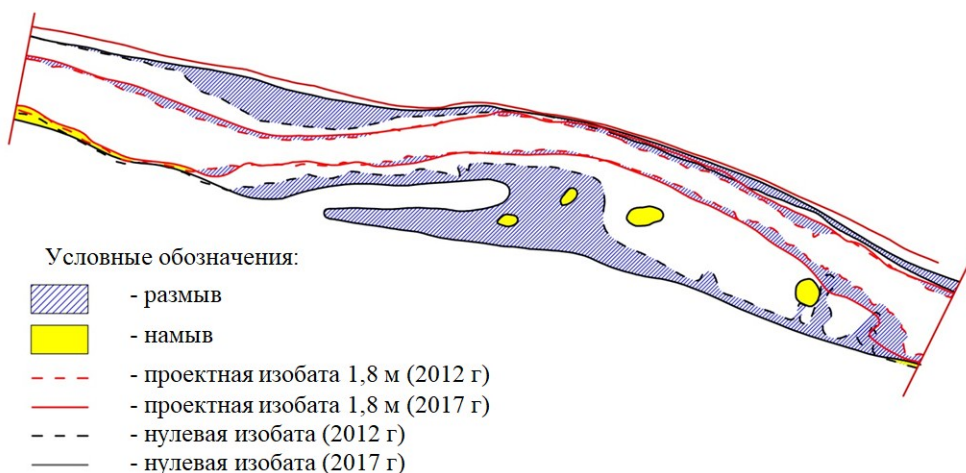


Рис. 4. Совмещенный план Казанцевского перекатного участка р. Белой

После Среднеказанцевского переката судовой ход вновь принимает прямолинейное очертание; за рассматриваемый период значительных изменений на данном участке не происходило.

На Нижнеказанцевском перекате судовой ход смещается к правому берегу, достигая бровки коренного берега. С 2012 г. полоса судового хода увеличилась в среднем на 20 м.

Для оценки устойчивости рассматриваемого участка реки были построены планы течений на участке реки по методу плоских сечений в соответствии с методикой, рекомендованной [4].

По результатам выполненных расчетов построены интегральные кривые расходов (рис. 5).

Построенные планы течения для естественного состояния и после отработки потенциального карьера (рис. 6) выявили интенсивное смещение струй в сторону размещаемого участка недр, что является недопустимым и требует разработки мероприятий по снижению данного фактора.

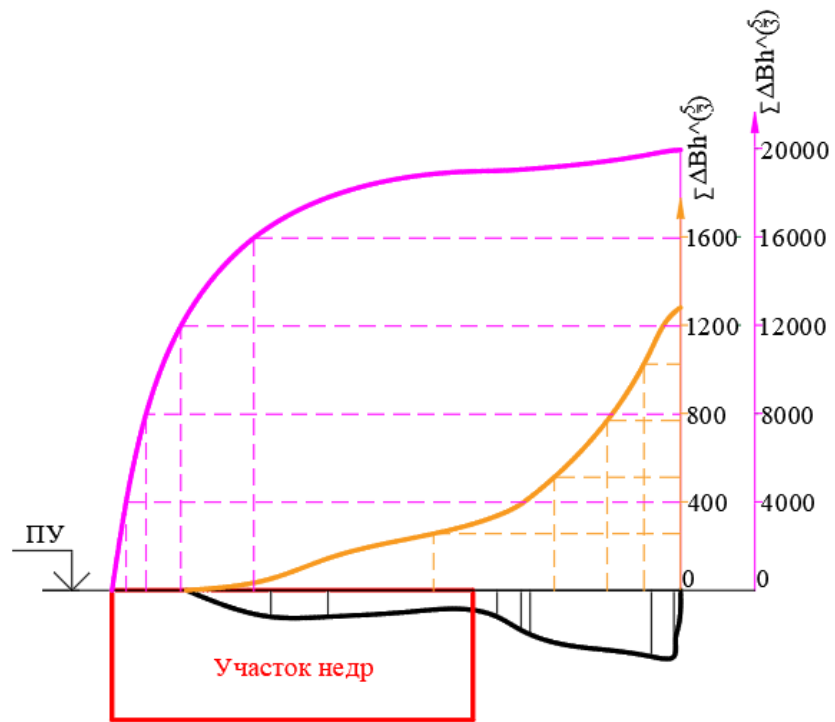


Рис. 5. Интегральная кривая расходов (сечение 4-4)

Для снижения выявленного негативного фактора предлагается устройство полузапруд. Влияние полузапруд на структуру потока исследовано и подробно изложено [8]. Анализ данных исследований показал приемлемость предлагаемого варианта снижения негативного влияния на русловой режим.

В рамках исследования определены (по методу ЛИИВТа [8]) основные параметры выправительной трассы, которые представлены в результирующей таблице (табл. 1).

Зная ширину выправительной трассы ( $B_m$ ); бытовую ширину русла ( $B_6$ ) и угол наклона полузапруды к направлению течения  $\alpha \leq 90^\circ$ , логично предположить, что длина полузапруды равна:

$$l_n = (B_6 - B_m) / \sin \alpha \quad (1)$$

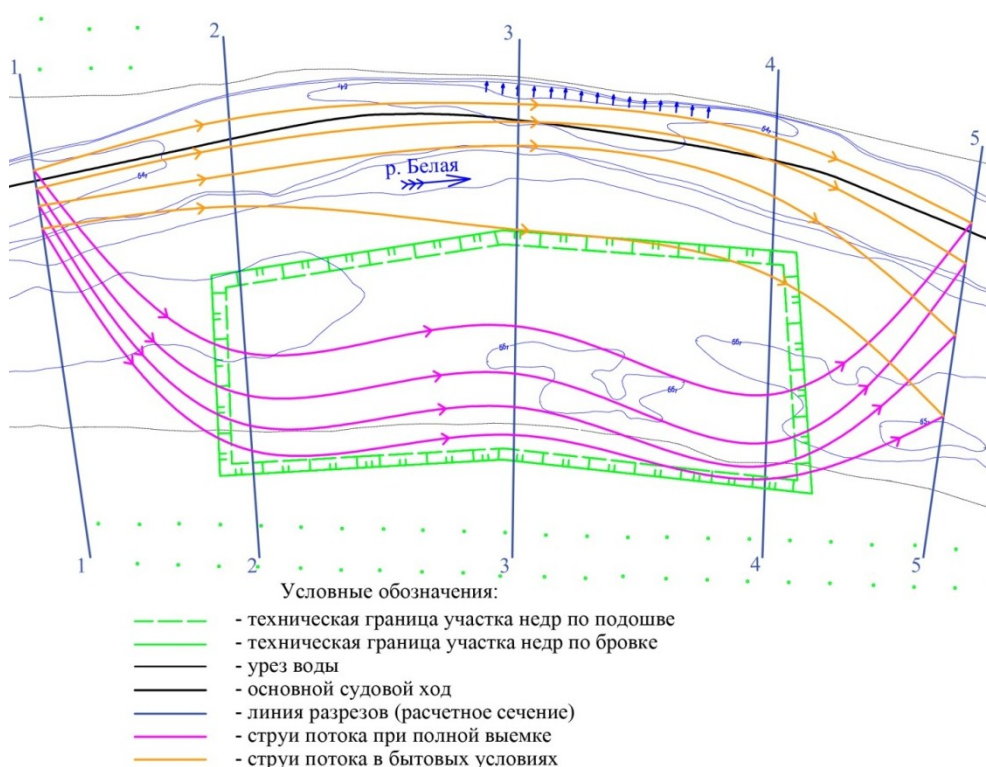


Рис. 6. Планы течения для естественного состояния и после отработки участка недр

В ходе определения параметров выправительных сооружений выполнены следующие построения и расчеты:

- выявлены значения расчетного расхода воды ( $Q_p$ ) и расчетного уровня ( $H_p$ );
- на план затруднительного участка нанесена выправительная трасса и предварительное расположение полузапруд, изображены поперечные сечения в створах выправительных сооружений до расчетного уровня (ПУ=67,8 м БС);
- построены интегральные кривые распределения расхода воды при расчетном уровне и определены расходы воды ( $Q_{св.б.}$ ), проходящие в пределах выправительной трассы в бытовом состоянии русла, а также площадь ( $\omega_{св}$ ) этой части поперечного сечения;
- подсчитан потребный расход воды в пределах выправительной трассы ( $Q_{св}$ ), который может обеспечить необходимый размыв дна в пределах судовой хода;
- вычислен основной показатель работы затопленной полузапруды по перераспределению расхода воды по ширине русла;
- определены:
  - часть площади поперечного сечения, перекрываемого полузапрудой ( $\omega_n$ );
  - часть площади поперечного сечения, расположенную над гребнем полузапруды до расчетного уровня воды ( $\omega_{сл}$ );

- полная площадь поперечного сечения при уровне вровень с гребнем полузапруды ( $\omega_{св.б}$ );
- определены коэффициенты, характеризующие степень затопления полузапруды ( $K_{сл}$ ) и степень стеснения потока ( $m$ ) по формулам;
- построены кривые зависимости  $K_{сл}=f_1(z_2)$ ,  $m=f_2(z_2)$ ,  $K_{сл}=f_3(m)$ , на которые нанесена опытная прямая  $K_{сл}=f_4(m, K_{св})$ , соответствующая требуемому значению параметра ( $K_{св}$ ).

По результатам получено:

- ось полузапруд должна быть перпендикулярна или направлена против течения до 10 градусов;
- корень полузапруд должен опираться на коренной берег с выходом на бровку;
- в продольном вертикальном разрезе профиль должен иметь ныряющий тип, т.е. по мере снижения уровней воды тело плотины должно появляться от корня к голове;
- высота головы полузапруды не должна превышать 1 м от проектного уровня для обеспечения её сохранности во время ледохода, ширина гребня должна быть принята не менее 3 м.

*Таблица 1*

**Параметры расчетного поперечного профиля русла в створе полузапруды в зависимости от отметки гребня головы полузапруды**

№ ПЛЗ	$z_2, см$	$\omega_{св.б}, М^2$	$\omega_{св}, М^2$	$\omega_n, М^2$	$\omega_{сл}, М^2$	$K_{сл}$	$m$
1	ПУ+100	1160,4	836,2	324,2	0	0	0,28
	ПУ+50	867,3	681,2	186,1	238,1	1,28	0,21
	ПУ	574	527	47	277,2	5,9	0,08
2	ПУ+100	1159,8	725,9	433,9	0	0	0,37
	ПУ+50	875,1	589,9	285,2	148,7	0,53	0,33
	ПУ	601,4	453,9	147,5	246,4	1,67	0,25
	ПУ-15	521,5	287,1	108,4	359,7	3,32	0,207
3	ПУ+100	1290,6	751	539,6	0	0	0,418
	ПУ+50	1003,8	625	378,8	160,8	0,42	0,377
	ПУ	720,6	499	221,6	318	1,43	0,308
	ПУ-40	496,6	398,3	98,3	441,3	4,49	0,198

С целью определения эффективности решений по устройству полузапруд логично было бы построить план течения реки для данного расчетного случая. Однако построение плана течений базируется на методе М.А. Великанова («способ плоских сечений»), в основе которого лежит интегрирование площади поперечного сечения русла (распределение расхода по ширине русла зависит только от глубин), что будет не совсем корректно при отображении структур потока при строительстве выправительных сооружений. Поэтому в дальнейших исследованиях был применен метод численного моделирования в трехмерной постановке, способный наиболее полно описать особенности структуры потока на изгибе русла, основанный на компьютеризированном решении, обладающий большими размерами систем уравнений гидравлики (гидродинамики) и деформации русла.

Основными преимуществами численных методов исследования являются: возможность решения задачи в двумерной (плановой) и трёхмерной

(пространственной) постановках; возможность охвата расчётами участка реки, включающего одновременно участок расположения руслового карьера или группы карьеров и зону влияния карьеров на состояние реки; оперативность расчётов для определения оптимального варианта разработки карьера; применимость для случаев сложной морфологии русла, в том числе строительстве выправительных сооружений.

Отправной точкой описания любых гидродинамических процессов является решение полной системы дифференциальных уравнений Навье-Стокса:

$$\begin{aligned} \frac{dV_x}{dt} - \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right) &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{dV_y}{dt} - \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} \right) &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{dV_z}{dt} - \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \\ \frac{dV_z}{dx} + \frac{dV_z}{dy} + \frac{dV_z}{dz} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} \end{aligned} \quad (2)$$

где:  $V_x, V_y, V_z$  – компоненты скоростей в проекции на соответствующую ось;  $p$  – давление в конкретной точке потока;  $\nu$  – эффективная вязкость, определяемая выражением.

$$\nu = \nu_k + \nu_t \quad (3)$$

где:  $\nu_k$  – кинематическая вязкость среды;  $\nu_t$  – турбулентная вязкость.

Наиболее распространенным способом описания этой величины является  $k$ - $e$  подход. Согласно ему, величина коэффициента турбулентного обмена определяется по формуле:

$$\nu_t = C_p \cdot \frac{k^2}{e} \quad (4)$$

где:  $k$  – кинематическая энергия турбулентности;

$C_p$  – турбулентная константа среды;

$e$  – диссипация турбулентной энергии.

Последние две величины определяются по математическим моделям, наиболее популярными из которых являются модели второго порядка Джонсона-Лаундера.

Согласно уравнению математической физики, для получения окончательных численных результатов систему уравнений (2) необходимо дополнить граничными (краевыми) условиями и начальными условиями (в случае решения нестандартной задачи). Помимо этого, определяются область пространства, для которого решается задача, то есть формируется расчетная область задачи. В нашем случае это будет участок русла реки Белой в районе потенциального карьера между двумя живыми сечениями, перпендикулярными к динамической оси потока, в границах которого можно достоверно судить о характере распределения скорости.

Термин “начальное условие” относится к величинам, присваиваемым переменным во всех узлах расчетной сетки перед началом вычисления (значение на момент времени  $t=0$ ).

Наиболее часто для решения задач моделирования речного потока используются следующие граничные условия: входное, выходное, непротекания, по давлению и симметрии.

Расчеты были проведены при тех же исходных данных по двум вариантам: при полной разработке потенциального карьера без возведения полузапруд и при полной разработке потенциального карьера с возведением полузапруд.

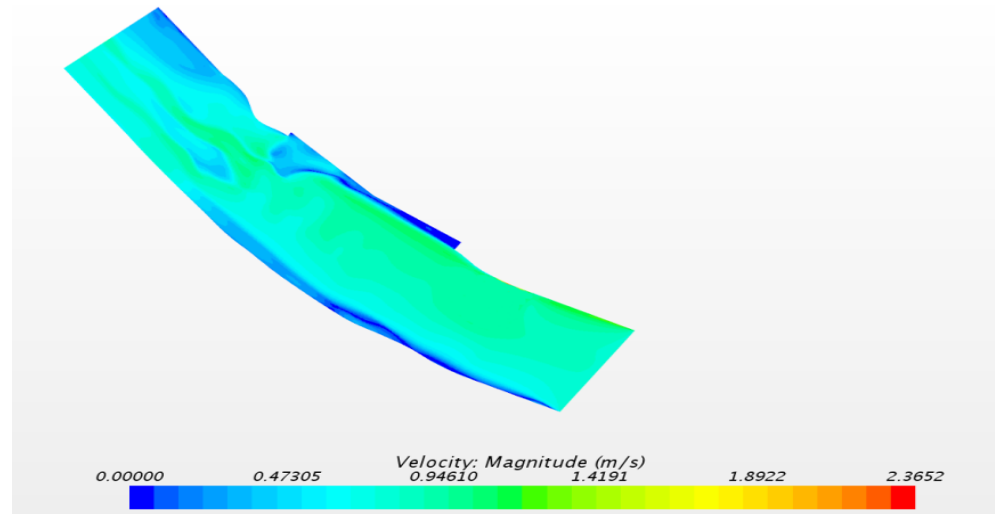


Рис. 7. Распределение скоростей речного потока при полной разработке потенциального карьера без возведения полузапруд

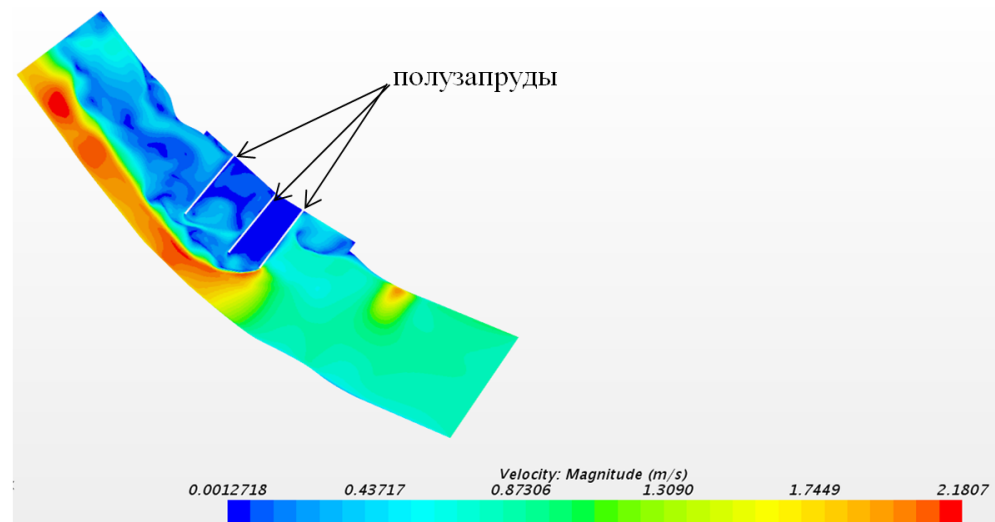


Рис. 8. Распределение скоростей речного потока при полной разработке потенциального карьера с возведением полузапруд

Сопоставление полученных вариантов (рис. 6, 7, 8) показало, что отработка рассматриваемого карьера с одновременным возведением полузапруд наиболее приемлема, т.к. способствует увеличению глубины судоходной части русла за счет увеличения скоростей течения. Кроме того, возведение полузапруд способствует



ускорению заиления отработанного пространства участка недр и впоследствии намыву побочня, т.к. снижает скорость течения на участке потенциального карьера и ниже по течению (рис. 8).

**Результаты** приведённой работы показали:

1. По результатам гидравлических расчетов посадки уровня воды выявлено, что разработка ПГМ общим объемом 50 тыс. м<sup>3</sup> с глубиной разработки до 10 м от ПУ не окажет значительного влияния на уровненный режим участка, посадка уровня составит не более 1,7 см, что не превышает общепринятого критериального значения 10 см.

При выработке за одну навигацию сосредоточенной выемки объемом извлеченного грунта порядка 250 тыс. м<sup>3</sup>, посадка уровня составит не более 6,4 см, что также не превышает общепринятого критериального значения 10 см.

При полной единовременной разработке участка недр величина посадки уровня воды в районе верховой кромки карьера составит 18,8 см, что значительно превышает допустимое значение посадки уровня 10 см, следовательно, разработка карьера по данному варианту оказывает значительное негативное влияние на уровненный режим реки Белой в районе месторождения и недопустима.

Таким образом, объем годовой добычи с участка недр необходимо ограничить 250 тыс. м<sup>3</sup> в год.

2. Анализ многолетних деформаций участка Верхне-, Средне- и Нижнеказанцевского перекатов показал их относительную устойчивость.

Однако побочень, расположенный на правом берегу и обеспечивший данному участку относительную устойчивость, подвержен незначительном размыву, ввиду чего к настоящему времени представлен в виде песчано-гравелистой косы протяженностью в 1 км, которая играет роль струенаправляющей дамбы.

3. Анализ построенных интегральных кривых расходов (рис. 5), планов течений для естественного состояния и после отработки потенциального карьера (рис. 6) выявил интенсивное смещение струй течения в сторону размещаемого участка недр.

Для стабилизации влияния разработки потенциального карьера на структуру потока и создания предпосылок для намыва побочня, расположенного на правом берегу, обеспечившего данному участку относительную устойчивость, предлагается строительство трех полузапруд.

Расчеты влияния работ на структуру потока показали необходимость возведения выправительных сооружений с одновременной разработкой участка недр. Строительство полузапруд значительно снижает негативное влияние работ по добыче на рассматриваемом участке реки Белая, что проиллюстрировано на рис. 7 и 8.

### **Заключение**

В настоящий момент в связи с интенсивным развитием строительства в Российской Федерации имеется большой спрос на НСМ (в т.ч. добываемые из русел рек), что требует размещения новых карьеров. Опубликованными исследованиями различных авторов показана необходимость всестороннего исследования влияния разработки русловых карьеров на гидрологические характеристики (в том числе судоходных рек) [9, 10]. Состав данных исследований регламентируется [4, 5], однако в каждом конкретном случае он должен уточняться, исходя из гидрологического и судоходного режима рассматриваемой реки (участка реки). В рамках проведенного исследования были оценены возможные последствия разработки участка недр на гидрологические и судоходные условия, определены условия, при которых выявленные негативные факторы будут минимизированы, а работы по добыче будут возможны.

**Список литературы**

1. Послание Президента РФ Федеральному Собранию «Послание Президента Федеральному Собранию» от 21.04.2021.
2. Распоряжение Правительства РФ «О транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» от 27.11.2021 № 3363-р // Официальный интернет-портал правовой информации. – 2021 г. – с изм. и допол. в ред. от 03.12.2021.
3. Атлас Единой глубоководной системы Европейской части РФ. том 10. От реки Уфа до устья, ФБУ «Администрация «Волго–Балт», 2017 г.
4. СТО 52.08.31–2012 «Добыча нерудных строительных материалов в водных объектах. Учет руслового процесса и рекомендации по проектированию и эксплуатации русловых карьеров». – СПб.: Глобус, 2012. – 140 с.
5. Рекомендации по прогнозу деформаций речных русел на участках размещения карьеров и в нижних бьефах гидроузлов // Гос. гидрол. ин–т, Гл. упр. гидрологии и метеорологии Болг. акад. наук, Ин–т гидрологии и метеорологии; [и др.]. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 127 с.
6. Методика расчета понижения уровней воды при добыче нерудных строительных материалов // М–во реч. флота РСФСР, Гл. упр. портов; [и др.]. – М.: Транспорт, 1984. – 21 с.
7. Руководство по проектированию русловых карьеров. Мероприятия по предотвращению понижения уровней воды. – М.: Транспорт, 1987. – 50 с.
8. Жданов В.В. Руководство по проектированию, строительству и эксплуатации выправительных сооружений из грунта / В. В. Жданов. – М.: Транспорт, 1971. – 191 с.
9. Агеева В.В. Оценка воздействия разработки карьера по добыче песка из русла реки на изменение гидрологического режима и руслоформирование / В.В. Агеева, Ю.А. Градинар // Сборник докладов II Международной научно-практической конференции «Экологическая безопасность и устойчивое развитие урбанизированных территорий». – Н. Новгород: ННГАСУ, 2019. – С. 4–8.
10. Техногенная трансформация русла р. Обь в нижнем бьефе Новосибирского гидроузла и её влияние на состояние водного пути / Р.С. Чалов, С.В. Павлушкин, К.М. Беркович, С.Н. Рулева // РЕЧНОЙ ТРАНСПОРТ (XXI ВЕК). – 2021. – № 4. – С. 30–35. – ISSN 1729–4258
11. Влияние добычи НСМ на русловой режим и судоходные условия на нижней Каме // Совершенствование проектирования, реконструкции содержания воднотранспортных гидротехнических сооружений, организации производства путевых работ (Сб. Трудов ЛИВТа). – 1992. – С. 126–145.
12. Ситнов А.Н. Особенности разработки пойменных карьеров НСМ в меандрирующих руслах рек (на примере р. Белая) / А.Н. Ситнов, М.В. Шестова, Ю.Е. Воронина // Труды 22–го международного научно–промышленного форума «Великие реки – 2020». – Н. Новгород: ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2020. – С. 42. – ISBN 978-5-901722-67-1
13. Барышников, Н. Б. Русловые карьеры и их влияние на судоходство / Н.Б. Барышников, Д.И. Исаев // Внутренние водные пути России. История. Современность. Перспективы...: Региональная научно–техническая конференция, посвященная 200–летию государственного управления водными коммуникациями России. Материалы конференции и тезисы докладов, Санкт–Петербург, 13 марта 1998 года. – СПб: Санкт–Петербургский государственный университет водных коммуникаций, 1998. – С. 84–90.
14. Беркович К. М. Природно-ориентированные подходы к добыче аллювиальных строительных материалов из речных русел и пойм / К. М. Беркович, Л. В. Злотина, Л. А. Турыкин // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о земле. – 2012. – № 3. – С. 3–13. – ISSN 2412-9518
15. Yalin M.S. Theory of hydraulic models. Macmillan, London, 1971 – s. 266.
16. Babarutsi S., Nassiri M., and Chu V.H. Computation of shallow recirculating flow dominated by friction // Journal of Hydraulic Engineering. 1996 V. 122 No. 7 P. 367–372.

17. Lagasse P. F., Winkey B. R., Simmons D. B. Impacts of gravel mining on river system stability // J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering Division, American Society of Civil Engineers. 1980. Vol. 106. P. 398-404.
18. Kondolf G.M. Geomorphic and environmental effects of instream gravel mining // Landscape and Urban Planning. 1994. Vol. 28. P. 225-243.

#### References

1. Poslanie Prezidenta RF Federal'nomu Sobraniyu «Poslanie Prezidenta Federal'nomu Sobraniyu» ot 21.04.2021.
2. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF «O transportnoj strategii Rossijskoj Federacii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda» ot 27.11.2021 № 3363-r // Oficial'nyj internet-portal pravovoj informacii. – 2021 g. – s izm. i dopol. v red. ot 03.12.2021.
3. Atlas Edinoj glubokovodnoj sistemy Evropejskoj chasti RF. tom 10. Ot reki Ufa do ust'ya, FBU «Administraciya «Volgo–Balt», (2017).
4. STO 52.08.31–2012 «Dobycha nerudnyh stroitel'nyh materialov v vodnyh ob'ektah. Uchet ruslovogo processa i rekomendacii po proektirovaniyu i ekspluatacii ruslovnyh kar'erov». – SPb.: Globus, 2012. – s. 140.
5. Rekomendaciyam po prognozu deformacij rechny'x rusel na uchastkax razmesheniya kar'erov i v nizhnix b'efax gidrouzlov, - Leningrad: Transport, 1988 g.
6. Metodika rascheta ponizheniya urovnej vody pri dobyche nerudnyh stroitel'nyh materialov // M–vo rech. flota RSFSR, Gl. upr. portov; [i dr.]. – M.: Transport, 1984. – s. 21.
7. Rukovodstvo po proektirovaniyu ruslovny'x kar'erov. Meropriyatiya po predotvrashheniyu ponizheniya urovnej vody / Ministerstvo rechnogo flota RSFSR / , Leningrad: Transport, 1987 g.
8. Zhdanov, V.V. Rukovodstvo po proektirovaniyu, stroitel'stvu i ekspluatacii vypravitel'nyh sooruzhenij iz grunta – M.: Transport, 1971. – s. 191.
9. Ageeva, V.V., Gradinar, Y.A. «Assessment of the impact of the development of a quarry for the extraction of sand from the riverbed on changes in the hydrological regime and riverbed formation» Sbornik dokladov II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Ekologicheskaya bezopasnost' i ustojchivoe razvitie urbanizirovannyh territorij». – N. Novgorod: NNGASU, 2019. – P. 4–8.
10. Chalov, R.S., Pavlushkin, S.V., Berkovich, K.M., Ruleva, S.N. "Tekhnogennaya transformaciya rusla r. Ob' v nizhnem b'efe Novosibirskogo gidrouzla i eyo vliyanie na sostoyanie vodnogo puti" RECHNOJ TRANSPORT (XXI VEK). – 2021. – № 4. – P. 30-35. – ISSN 1729–4258
11. Vliyanie dobychi NSM na ruslovoj rezhim i sudohodnye usloviya na nizhnej Kame // Sovershenstvovanie proektirovaniya, rekonstrukcii sodержaniya vodnotransportnyh gidrotekhnicheskikh sooruzhenij, organizacii proizvodstva putevyh rabot (Sb. Trudov LIVTa). – 1992. – P. 126–145.
12. Sitnov, A.N. «Features of development of NSM floodplain quarries in meandering river beds (using the example of the Belaya river)» V sbornike: Trudy 22-go mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma «Velikie reki-2020».
13. Baryshnikov, N. B., Isaev, D.I. «Ruslovyje kar'ery i ih vliyanie na sudohodstvo» Vnutrennie vodnye puti Rossii. Istoriya. Sovremennost'. Perspektivy...: Regional'naya nauchno–tehnicheskaya konferenciya, posvyashchennaya 200–letiyu gosudarstvennogo upravleniya vodnymi kommunikacijami Rossii. Materialy konferencii i tezisy dokladov, Sankt–Peterburg, 13 marta 1998 goda. – SPb: Sankt–Peterburgskij gosudarstvennyj universitet vodnyh kommunikacij, 1998. – P. 84–90.
14. K. M. Berkovich, L. V. Zlotina, L. A. Turykin "Prirodno-orientirovannye podhody k dobyche allyuvial'nyh stroitel'nyh materialov iz rechny'x rusel i pojm" Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya Biologiya. Nauki o zemle. – 2012. – № 3. – pp. 3–13. – ISSN 2412-9518
15. Yalin M.S. Theory of hydraulic models. Macmillan, London, 1971 – s. 266.
16. Babarutsi S., Nassiri M., and Chu V.H. Computation of shallow recirculating flow dominated by friction // Journal of Hydraulic Engineering. 1996 V. 122 No. 7 P. 367–372.

17. Lagasse P. F., Winkey B. R., Simmons D. B. Impacts of gravel mining on river system stability // J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering Division, American Society of Civil Engineers. 1980. Vol. 106. P. 398-404.
18. Kondolf G.M. Geomorphic and environmental effects of instream gravel mining // Landscape and Urban Planning. 1994. Vol. 28. P. 225-243.

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

**Агеева Вера Валерьевна**, к.т.н., доцент кафедры гидравлики, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (ФГБОУ ВО «ННГАСУ»), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65, e-mail: sbag.nn@yandex.ru

**Vera V. Ageeva**, PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Department of hydraulics, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 65, Ilinskaya st, Nizhny Novgorod, 603950

**Люкина Екатерина Андреевна**, студент специальности 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений», Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (ФГБОУ ВО «ННГАСУ»), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65, e-mail: luykinakatya@yandex.ru

**Ekaterina A. Lyukina**, Student of the specialty 08.05.01 «Construction of unique buildings and structures, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 65, Ilinskaya st, Nizhny Novgorod, 603950

**Матюгин Михаил Александрович**, доцент к.т.н., доцент кафедры водных путей и гидросооружений, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: mihailmatyugin@mail.ru

**Mikhail A. Matyugin**, PhD in Associate Professor of the Department of waterways and hydraulic structures, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 11.04.2022; опубликована онлайн 07.06.2022.  
Received 11.04.2022; published online 07.06.2022.

УДК 656.621/.626; 627.423  
DOI: 10.37890/jwt.vi71.265

## **Оценка техногенной нагрузки по интенсивности дноуглубительных работ на перекатных участках реки Обь**

**Ю.И. Бик**<sup>1</sup>

<https://orcid.org/0000-0003-2884-8348>

**М.А. Бучельников**<sup>1</sup>

<https://orcid.org/0000-0002-7975-6390>

**В.Н. Кофеева**<sup>1</sup>

<https://orcid.org/0000-0002-7361-7947>

**В.А. Бобыльская**<sup>1</sup>

<https://orcid.org/0000-0003-2347-3890>

<sup>1</sup> *Сибирский государственный университет водного транспорта, г. Новосибирск, Россия*

**Аннотация.** Объектом исследования является проведение транзитных дноуглубительных работ в русле реки Обь за большой промежуток времени (2000-2020 годы). Проанализирована частота и объемы дноуглубления на тех перекатах, которые создавали затруднения для судоходства. На основании обширных первичных данных рассчитаны такие параметры как: количество разработок за рассматриваемый период, средний объем за одну разработку, суммарный объем перемещенного грунта по каждому перекату, количество периодов три и более лет, в которые проводилось дноуглубление на перекате). Предложенные параметры имеют технико-экономическое и экологическое значение. Установлено, что в указанный период дноуглубление требовалось на перекатах. Наиболее сильному воздействию подвержены перекаты на участке Подходной канал шлюза Новосибирской ГЭС - устье реки Томи. Ряд перекатов подвергался дноуглублению практически непрерывно в течении 5-7 и более лет. Для установления связи между показателями вычислены коэффициенты корреляции ( $r_{xy}$ ) в парах «Количество разработок» – «Объем всего» и «Количество разработок» – «Средний объем». Обнаружено, что между количеством разработок и общим объемом перемещенного грунта существует значительная положительная связь. Столь же сильной связи между количеством разработок на перекате и средним объемом одной прорези не прослеживается. Отмечены недостатки и преимущества предлагаемого способа оценки.

**Ключевые слова:** дноуглубление, оценка воздействия, перекатные участки, техногенная нагрузка, река Обь.

## **Assessment of the technogenic load by the intensity of dredging operations on the rolling sections of the Ob River**

**Yuriy I. Bic**<sup>1</sup>

<https://orcid.org/0000-0003-2884-8348>

**Mikhail A. Buchelnikov**<sup>1</sup>

<https://orcid.org/0000-0002-7975-6390>

**Vera N. Kofeeva**<sup>1</sup>

<https://orcid.org/0000-0002-7361-7947>

**Viktoria A. Bobylskaya**<sup>1</sup>

<https://orcid.org/0000-0003-2347-3890>

<sup>1</sup> *Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia*

**Abstract.** The object of the study is to carry out transit dredging operations in the bed of the Ob River over a long period of time (2000-2020). The frequency and volumes of dredging on those rifts that created difficulties for navigation are analyzed. Based on extensive primary data, such parameters as: the number of developments during the period under review, the average volume per development, the total volume of displaced soil for each roll, the number of periods of three or more years in which dredging was carried out on the roll) were calculated. The proposed parameters have technical, economic and environmental significance. It was found that during the specified period dredging was required on the rifts. The rifts in the section of the Approach Channel of the Novosibirsk hydroelectric power station gateway - the mouth of the Tom River are most affected. A number of rifts have been dredged almost continuously for 5-7 years or more. To establish a relationship between the indicators, correlation coefficients ( $r_{xy}$ ) were calculated in the pairs "Number of developments" – "Total volume" and "Number of developments" – "Average volume". It was found that there is a significant positive relationship between the number of developments and the total volume of displaced soil. There is no equally strong connection between the number of developments on the roll and the average volume of one slot. The disadvantages and advantages of the proposed method of evaluation are noted.

**Keywords:** dredging, impact assessment, rolling areas, man-made load, Ob river.

### Введение

Река Обь – природно-техногенный комплекс, используемый самыми разными отраслями экономики: промышленностью, жилищно-коммунальным хозяйством, энергетикой, сельским хозяйством, водным транспортом. Морфологию русла Оби можно признать достаточно изученной [1, 2].

Обское судоходство крайне важно для всего западносибирского региона: оно обеспечивает устойчивую транспортную связь аграрных и промышленных районов юга с ресурсодобывающими территориями севера. Для поддержания водного пути в нормативном состоянии требуется ежегодное дноуглубление на множестве перекатных участков.

Объемы транзитных дноуглубительных работ на Оби были весьма различны [3,4]. В конце 80-х годов объемы дноуглубления достигали рекордных отметок (до 43 млн. м<sup>3</sup>) и продолжали оставаться весьма существенными вплоть до первой половины 90-х годов. В этот период происходило коренное изменение русла, была предпринята масштабная попытка обеспечить единую, устойчивую трассу судового хода с одновременным увеличением гарантированных глубин

Однако, уже к концу 90-х река стала возвращаться в свое естественное состояние. Таким образом, подобные методы поддержания и улучшения характеристик ВВП оказались практически неоправданными, финансово затратными и, безусловно, нереализуемыми в современных условиях с экономической и технической точки зрения.

С середины 90-х годов и до середины 2000-х объемы дноуглубления напротив оказались крайне низки (от 0,1 до 3 млн. м<sup>3</sup>), что оказалось совершенно недостаточным для поддержания гарантированных глубин, приводило к их падению, трудностям в период навигации, неэффективному использованию флота. При сохранении объемов дноуглубления на таком уровне, поддерживать гарантированные глубины с каждым годом становилось все сложнее. С 2007 года наблюдается рост объемов до 6,4 млн. м<sup>3</sup>. В дальнейшем он колебался в пределах 3,9 - 7,9 млн. м<sup>3</sup> в год.

Таким образом, наблюдается три периода дноуглубительных работ на Оби: «сверхинтенсивный» (70-е, 80-е, начало 90-х), «очевидно недостаточный» (вторая половина 90-х, 2000-е) и минимально необходимый, причем, ни один из них не оптимален: в 2014 году было дано научное обоснование ежегодного

эксплуатационного и капитального дноуглубления на Оби в пределах около 14 млн. м<sup>3</sup> в год с последующим снижением до 9-10 млн. м<sup>3</sup> в год [4].

На Нижней Оби объемы дноуглубления во все годы были существенно меньше: даже в 80-е годы они редко превышали 1 млн. м<sup>3</sup>, а в дальнейшем снизились до нескольких сотен тонн или же в отдельные годы вообще не проводились.

Анализ масштабов техногенного перемещения аллювия важен с производственной, экономической и экологической точек зрения. Для экономии госбюджетных средств, работы должны быть спланированы таким образом, чтобы объемы и повторяемость разработки прорезей стали минимально достаточными. Это же важно и для сбережения водных экосистем: снижение интенсивности факторов перемещаемого донного грунта, шлейфов мутности, шумового фактора уменьшает воздействие на бентосные, планктонные организмы и на ихтиофауну.

Учитывая вышеизложенное, целью представленных в статье исследований стал анализ объемов транзитных дноуглубительных работ в зоне ответственности ФБУ «Администрация обского бассейна внутренних водных путей» за 2000-2020 годы.

Авторы выражают благодарность Руководителю ФБУ «Администрация Обского БВП» к.т.н. С.В. Павлушкину за предоставленные материалы.

### **Методы**

Исходными данными для исследований послужили сведения об ежегодных объемах дноуглубительных работ на перекатных участках Оби, содержащиеся в Технических отчетах ФБУ «Администрация Обского БВП» за 2000-2020 годы.

На их основании были рассчитаны следующие параметры:

- количество разработок (количество лет, в которые они проводились на перекате за рассматриваемый период);
- средний объем перемещаемого донного грунта за одну разработку;
- объем всего (суммарный объем перемещенного грунта по каждому перекату за 2000-2020 годы);
- количество непрерывных повторностей (количество периодов три и более лет, в которые проводилось дноуглубление на перекате).

На наш взгляд, первые три показателя имеют преимущественно технико-экономическое значение: они позволяют определить на какой из перекатов затрачено наибольшее количество сил и средств. Первый и четвертый - имеют больше экологическое значение: воздействие на экосистемы большой реки определяется не только объемами работ, но и их повторяемостью, периодичностью воздействия, что обусловлено сроками восстановления бентосных организмов (1 год и более) [5].

Для установления связи между показателями вычислены коэффициенты корреляции ( $r_{xy}$ ) в парах «Количество разработок» – «Объем всего» и «Количество разработок» – «Средний объем».

Данные сведены в таблицы (табл. 1-6). Разбиение перекатов на участки слияние рек Бии и Катунь – Усть-Чарышская Пристань, Усть-Чарышская Пристань – г. Барнаул, г. Барнаул – г. Камень-на-Оби, Подходной канал – устье р. Томи, Томского и Колпашевского районов водных путей и судоходства содержится в Технических отчетах и сохранено для удобства анализа. Для каждого участка определены максимальные, минимальные и средние значения для параметров «Средний объем за одну разработку» и «Объем всего».

### Результаты

Полученные данные представлены в таблицах 1-6. Проанализируем их по изменениям каждого из показателей. Всего за рассматриваемый период дноуглубление потребовалось выполнить на 170 перекатах.

*Повторяемость.* Повторяемость работ был выбран в качестве наиболее существенного фактора. Как уже было сказано выше при частой повторяемости зообентос, как правило, не может полноценно восстановить свою численность на участке, подвергающемся воздействию. Так как рассматриваемый нами период составляет 21 год, то столь существенное воздействие будет наблюдаться на тех перекатах, дноуглубление на которых проводилось в количестве раз, близких к данному значению (постоянно или в какой-либо период): достаточно условно можно определить частоту более 10 раз.

Наибольшая повторяемость наблюдается на перекатах участка Нижний подходной канал - устье р.Томи, а также участка Томского района водных путей и судоходства. Здесь на 15 перекатах работы производились 10 и более раз; а на перекатах Верхний Кожевниковский - 17 раз, Чигалинский - 16, Орский – 14, т.е. воздействие можно признать крайне частым. На участке слияние Бии и Катунь - Усть-Чарышская пристань таких перекатов 4.

На участке Томского района водных путей и судоходства более 10 раз разрабатывалось 3 переката (Нижний Салтанаковский, Верхний Никольский и Никольский). На остальных участках случаев разработки более 10 раз не наблюдалось. Несколько реже (6-10 раз) разрабатывался за рассматриваемый период 41 перекат, остальные – 5 и менее раз.

*Количество непрерывных повторностей.* Количество непрерывных повторностей может быть 1 или 2 и только на перекате Ниж. Базанаковский – 3.

*Средний объем за одну разработку.* Данный параметр варьирует по участкам. Так на участке слияние Бии и Катунь - Усть-Чарышская пристань максимальные-минимальные значения составили 81,61 - 7,5 тыс. м<sup>3</sup>, при среднем 32 тыс. м<sup>3</sup>, Усть-Чарышская пристань - г. Барнаул 60,0-11,9 тыс. м<sup>3</sup>, среднее 44,25 тыс. м<sup>3</sup>, г. Барнаул - г.Камень-на-Оби 341,65 - 34,60 тыс. м<sup>3</sup>, среднее 98,65 тыс. м<sup>3</sup>, Нижний подходной канал - устье р.Томи 443,00 - 8,00 тыс. м<sup>3</sup> среднее 95,08, Томского района водных путей и судоходства 289,75 - 28,00 тыс. м<sup>3</sup>, среднее 117,62 тыс. м<sup>3</sup>, Колпашевского района водных путей и судоходства 248,15 - 45,2 тыс. м<sup>3</sup>, среднее 113,77.

*Объем всего.* На участке слияние Бии и Катунь - Усть-Чарышская пристань максимальные-минимальные значения составили 652,9-7,5 тыс. м<sup>3</sup>, при среднем 156,9 тыс. м<sup>3</sup>, Усть-Чарышская пристань - г. Барнаул 530-11,9 тыс. м<sup>3</sup>, среднее 139,8 тыс. м<sup>3</sup>, г. Барнаул - г.Камень-на-Оби 683,3 - 34,60 тыс. м<sup>3</sup>, среднее 204,20 тыс. м<sup>3</sup>, Нижний подходной канал - устье р.Томи 2234,00 - 8,00 тыс. м<sup>3</sup>, среднее 569,55 тыс. м<sup>3</sup>, Томского района водных путей и судоходства 2074,20- 28,00 тыс. м<sup>3</sup>, среднее 680,82 тыс. м<sup>3</sup>, Колпашевского района водных путей и судоходства 1496,70-45,2 тыс. м<sup>3</sup>, среднее 435,05.

Таблица 1

#### Дноуглубление на перекатах участка слияние Бии и Катунь - Усть-Чарышская пристань

№№	Название переката	Количество разработок	Средний объем за одну разработку (тыс. м <sup>3</sup> )	Объем всего (тыс. м <sup>3</sup> )	Количество непрерывных повторностей
1	Усть-Талицкий	10	31,70	317,00	2
2	Картуковский	10	29,00	290,00	2
3	Ниж.Акутихинский	10	43,70	437,00	2



4	Афанасьевский	10	52,57	525,70	2
5	Талицкий	8	38,88	311,00	1
6	Тимкинский	8	81,61	652,90	1
7	Верх. Талицкий	7	42,36	296,50	2
8	Верх. Акутихинский	7	43,01	301,10	1
9	Усть-Ануйский	6	23,68	142,10	0
10	Ниж.Быстроистокский	6	38,65	231,90	0
11	Завьяловский	6	44,90	269,40	1
12	Ниж.Усть-Ануйский	5	14,58	72,90	0
13	Акутихинский	5	27,20	136,00	0
14	Быстроистокский	5	25,00	125,00	0
15	Шелегинский	4	23,30	93,20	0
16	Ниж. Вяткинский	4	26,50	106,00	0
17	Верх. Усть-Ануйский	3	19,60	58,80	0
18	Кундешевский	3	17,97	53,90	0
19	Верх. Лиственничный	3	71,67	215,00	1
20	Верх. Кундышевский	2	17,25	34,50	0
21	Ниж. Погореловский	2	34,55	69,10	0
22	Фоминский	1	32,60	32,60	0
23	Усть-Чемровский	1	13,00	13,00	0
24	Усть-Песчаный	1	27,00	27,00	0
25	Ниж. Рогачевский	1	58,70	58,70	0
26	Верх. Чеканихинский	1	20,00	20,00	0
27	Соловковский	1	7,50	7,50	0
28	Верх.Шипуновский	1	30,00	30,00	0
29	Шипуновский	1	27,00	27,00	0
30	Дикий	1	32,40	32,40	0
31	Вяткинский	1	15,00	15,00	0
32	Ровный	1	19,00	19,00	0

Таблица 2

**Дноуглубление на перекатах участка Усть-Чарышская пристань - г. Барнаул**

№№	Название переката	Количество разработок	Средний объем за одну разработку (тыс. м <sup>3</sup> )	Объем всего (тыс. м <sup>3</sup> )	Количество непрерывных повторностей
1	Верх. Исаевский	9	58,90	530,10	1
2	Верх. Беловский	4	50,25	201,00	0
3	Сред. Беловский	3	53,00	159,00	0
4	Исаевский	2	36	72	0
5	Камышенский	1	11,90	11,90	0
6	Ниж. Усть-Татарский	1	60,00	60,00	0
7	Ниж. Усть-Кривой	1	46,40	46,40	0
8	Васюшкин	1	38	38	0

Таблица 3

**Дноуглубление на перекатах участка г. Барнаул - г.Камень-на-Оби**

№№	Название переката	Количество разработок	Средний объем за одну разработку (тыс. м <sup>3</sup> )	Объем всего (тыс. м <sup>3</sup> )	Количество непрерывных повторностей
1	Барнаульский	7	96,33	674,30	2

2	Сред.Шелаболихинский	4	61,75	247,00	0
3	Верх. Барнаульский	3	92,40	277,20	0
4	Самодуровский	3	79,67	239,00	0
5	Сред. Барнаульский	3	141,37	424,10	1
6	Верх. Пропускной	3	79,00	237,00	1
7	Ниж. Сибирский	3	93,90	281,70	0
8	Ниж. Шаболихинский	2	341,65	683,30	0
9	Сибирский	2	199,00	398,00	0
10	Сред.Кучукский	2	45,50	91,00	0
11	Пропускной	1	60,00	60,00	0
12	Мыльниковский	1	173,60	173,60	0
13	Логовский	1	98,50	98,50	0
14	Верх. Беловский	1	94,00	94,00	0
15	Верх. Исаевский	1	44,00	44,00	0
16	Касмалинский	1	64,00	64,00	0
17	Верх. Телеутский	1	50,40	50,40	0
18	Ниж. Боровиковский	1	60,00	60,00	0
19	Верх. Самодуровский	1	124,80	124,80	0
20	Верх. Кучукский	1	34,60	34,60	0
21	Верх. Каменский	1	100,00	100,00	0
22	Верх.Кучукский	1	36,00	36,00	0

Таблица 4

**Дноуглубление на перекатах участка Нижний подходной канал - устье р.Томи**

№№	Название переката	Количество разработок	Средний объем за одну разработку (тыс. м <sup>3</sup> )	Объем всего (тыс. м <sup>3</sup> )	Количество непрерывных повторностей
1	Верх. Кожевниковский	17	130,28	2214,80	2
2	Чигалинский	16	139,63	2234,00	1
3	Орский	14	73,93	1035,00	2
4	Степановский	12	138,67	1664,00	1
5	Верх. Кругликовский	12	84,71	1016,50	1
6	Новоталовый	12	98,08	1177,00	1
7	Медвежий	11	133,87	1472,60	2
8	Ташаринский	11	49,05	539,50	2
9	Орско-Борский	10	111,80	1118,00	2
10	Верх. Ташаринский	10	98,10	981,00	2
11	Лебединый	10	106,20	1062,00	1
12	Чичканский	10	111,10	1111,00	1
13	Борошной	10	81,20	812,00	3
14	Ниж. Базанаковский	10	112,10	1121,00	1
15	Верх. Брагинский	10	87,50	875,00	0
16	Мочищенский	8	79,05	632,40	1
17	Баской	8	87,38	699,00	1
18	Верх. Лебединый	8	119,13	953,00	0
19	Ниж. Монастырский	8	143,13	1145,00	0
20	Верх. Монастырский	8	69,63	557,00	1
21	Ниж. Чаусский	7	114,86	804,00	1
22	Ниж. Гусинный	7	43,14	302,00	1
23	Верх. Астраханцевский	7	121,14	848,00	1
24	Чаусский	6	89,17	535,00	0

25	Заводовский	6	95,50	573,00	0
26	Ниж. Телячий	6	127,67	766,00	1
27	Сред. Мочищенский	5	99,60	498,00	0
28	Ниж. Дрегуновский	5	75,80	379,00	1
29	Брагинский	5	69,80	349,00	1
30	Сред. Дубровинский	5	93,20	466,00	0
31	Умревинский	5	39,40	197,00	0
32	Телячий	5	115,20	576,00	0
33	Ниж. Чичканский	5	96,56	482,80	0
34	Кожевниковский	5	89,80	449,00	1
35	Ниж. Дубровинский	4	117,48	469,90	0
36	Ниж. Кудряшовский	4	53,00	212,00	0
37	Верх. Мочищенский	4	64,50	258,00	1
38	Верх. Базанаковский	4	93,00	372,00	0
39	Базанаковский	4	89,75	359,00	1
40	Ниж. Умревинский	3	58,33	175,00	0
41	Ниж. Мочищенский	3	76,50	229,50	1
42	Верх. Каштаковский	3	99,00	297,00	0
43	Оськинский	3	52,33	157,00	0
44	Кулманский	3	100,00	300,00	0
45	Верх. Елобогатский	2	137,00	274,00	0
46	Ниж. Елобогатский	2	44,50	89,00	0
47	Ниж. Кругликовский	2	109,50	219,00	0
48	Монастырский	2	80,00	160,00	0
49	Дрегуновский	2	43,00	86,00	0
50	Саргатский	2	78,50	157,00	0
51	Сосновый	2	95,00	190,00	0
52	Ниж. Ташаринский	1	10,00	10,00	0
53	Камешковский	1	75,00	75,00	0
54	Астраханцевский	1	304,00	304,00	0
55	Каштаковский	1	23,00	23,00	0
56	Сред. Монастырский	1	26,00	26,00	0
57	Дубровинский	1	125,00	125,00	0
58	Ниж. Бугринский	1	443,00	443,00	0
59	Верх. Кудряшевский	1	8,00	8,00	0
60	Верх. Лебединский	1	60,00	60,00	0
61	Тумурчукский	1	20,00	20,00	0

Таблица 5

**Дноуглубление на перекатах участка Томского района водных путей и судоходства**

№№	Название переката	Количество разработок	Средний объем за одну разработку (тыс. м <sup>3</sup> )	Объем всего (тыс. м <sup>3</sup> )	Количество непрерывных повторностей
1	Ниж. Салтанаковский	16	127,56	2040,90	2
2	Верх. Никольский	15	138,28	2074,20	1
3	Никольский	12	151,90	1822,80	2
4	Верх. Албазинский	10	124,38	1243,80	1
5	Албазинский	10	140,86	1408,60	1
6	Касогасовский	10	108,40	1084,00	1
7	Першинский	9	87,50	787,50	1
8	Заречный	8	158,45	1267,60	0
9	Монатковский	8	63,85	510,80	2

10	Ниж.Никольский	7	109,90	769,30	1
11	Верх. Родновский	7	83,06	581,40	1
12	Тайзаковский	6	101,23	607,40	1
13	Бакланий	5	116,58	582,90	1
14	Ниж.Михайловский	5	73,84	369,20	0
15	Черноярский	4	108,23	432,90	0
16	Бровцевский	4	83,03	332,10	0
17	Верх.Кайбасовский	4	191,30	765,20	0
18	Ниж.Сарафановский	4	129,43	517,70	1
19	Михайловский	4	83,63	334,50	0
20	Верх.Старообский	3	79,87	239,60	1
21	Березовский	2	118,55	237,10	0
22	Ниж.Молчановский	2	77,70	155,40	0
23	Родновский	2	135,80	271,60	0
24	Канангинский	2	289,75	579,50	0
25	Новосонровский	2	200,35	400,70	0
26	Сред.Салтанаковский	1	28,00	28,00	0
27	Кайбасовский	1	73,80	73,80	0
28	Верх.Першинский	1	97,80	97,80	0
29	Тискинский	1	128,60	128,60	0

Таблица 6

**Дноуглубление на перекатах участка Колпашевского района водных путей и судоходства**

№№	Название переката	Количество разработок	Средний объем за одну разработку (тыс. м <sup>3</sup> )	Объем всего (тыс. м <sup>3</sup> )	Количество непрерывных повторностей
1	Колпашевский	8	187,09	1496,70	1
2	Ниж.Колгужакский	8	137,65	1101,20	0
3	Ниж.Колпашевский	5	103,72	518,60	1
4	Куяльцевский	5	115,90	579,50	0
5	Зыряновский	5	172,38	861,90	0
6	Тяжинский	4	50,80	203,20	0
7	Кабанюрский	4	96,58	386,30	0
8	Ниж.Киевский	4	94,10	376,40	0
9	Ниж.Ласкинский	3	115,50	346,50	0
10	Киевский	3	183,67	551,00	0
11	Усть-Чаянский	2	65,35	130,70	0
12	Верх.Ерганский	2	132,00	264,00	0
13	Ласкинский	2	99,35	198,70	0
14	Сред.Ласкинский	2	248,15	496,30	0
15	Парбинский	2	74,10	148,20	0
16	Верх.Ласкинский	1	45,20	45,20	0
17	Ниж.Ерганский	1	70,00	70,00	0
18	Лукашкинский	1	57,00	57,00	0

Рассмотрим связь между объемами дноуглубления и частотой разработки. Из таблицы 7 видно, что между количеством разработок и общим объемом перемещенного грунта существует значительная положительная связь (коэффициент корреляции  $r_{xy}$  на разных участках от 0,76 до 1,00). Однако, столь же сильной связи

между количеством разработок и средним объемом одной прорези не прослеживается (коэффициент корреляции  $r_{xy}$  от 0,09 до 0,43).

Таблица 7

**Корреляция между параметрами «Количество разработок» – «Объем всего» и «Количество разработок» – «Средний объем»**

Участок	Коэффициент корреляции ( $r_{xy}$ )	
	Количество разработок – Объем всего	Количество разработок – Средний объем
Слияние Бии и Катуня - Усть-Чарышская пристань	0,87	0,39
Усть -Чарышская пристань – г. Барнаул	1,00	0,43
г.Барнаул – г. Камень на Оби	0,76	0,09
Нижний подходной канал - устье р. Томи	0,92	0,26
Участок Томского района водных путей и судоходства	0,94	0,06
Участок Колпашевского района водных путей и судоходства	0,91	0,39

**Обсуждение**

Полученные результаты, на наш взгляд, подтверждают ранее выдвигавшийся в ряде работ [3, 4, 6] тезис о дноуглублении обских перекатов как о значимом экологическом факторе. Общее количество лимитирующих перекатов довольно велико, объемы можно признать существенными, а повторяемость в ряде мест – частой.

Степень воздействия транзитного дноуглубления на биоту была оценена нами ранее [7]. Установлено, что эксплуатационные дноуглубительные работы с объемами перемещения грунта примерно в 10 млн м<sup>3</sup> нанесут небольшой ущерб ихтиофауне.

С точки зрения воздействия на речные экосистемы предлагаемые показатели весьма удобны, однако, имеют ряд недостатки. Показатель «Количество непрерывных повторностей» был определен как количество непрерывных периодов в три и более годов и его значения оказались невелики. Вместе с тем целый ряд перекатов подвергался воздействию непрерывно и в течение 5 и даже 7 лет, что дает вероятность предполагать почти полное разрушение зообентосных сообществ на данных участках.

Впрочем, вопрос о сроках восстановления бентосных организмов после их погребения отвалами грунта, остается недостаточно изученным. Восстановление на песчаных грунтах происходит довольно быстро [7]. Воздействие дноуглубления на планктон носит многофакторный характер. По данным работы Менга, Ченя и других [9] восстановление сообществ некоторых гидробионтов занимает примерно год, однако эти данные получены для водных экосистем теплых, незамерзающих рек.

Представляется вероятным, что сила воздействия на биоту будет определяться целым рядом факторов [9]: способом проведения работ, составом грунта и иными. Также установлено, что дноуглубление влияет не только на гидробионты, но и на экосистемы поймы и островов [10].

Представляет интерес и полученные значения корреляции между параметрами «Количество разработок» – «Объем всего» и «Количество разработок» – «Средний объем». На первый взгляд, сильная положительная связь между количеством

разработок и общим объемом перемещенного грунта вполне логична. С другой - она свидетельствует о том, что крупные прорезы выполнялись довольно редко. Учитывая столь сильную связь, можно предложить параметр «Количество разработок» в качестве основного.

Отсутствие корреляции (или слабая корреляция) между параметрами «Количество разработок» – «Средний объем», на наш взгляд, также говорит о том, что ситуация на перекатах складывается различно: выполняются как более масштабные прорезы, так и менее, но более часто.

Безусловно, на используемые нами данные накладывался фактор зависимости объемов выполненных работ от текущего финансирования. Кроме того, очевидно, что в маловодные годы требовалось углубление большего числа перекатов.

Обращают на себя внимание те перекаты, дноуглубление на которых проводилось практически ежегодно, а объемы перемещенного донного грунта превышают 1000 тыс. м<sup>3</sup> за рассматриваемый период. Именно здесь техногенное воздействие можно оценить как наиболее интенсивное: масштабное и частое. Эти участки в первую очередь нуждаются в проектировании и выполнении капитальных прорезей, в мероприятиях по коренному улучшению судоходных условий.

### **Заключение**

На наш взгляд объемы дноуглубительных работ на перекатах Верхней и Средней Оби можно признать довольно значительными, однако вполне обоснованными с точки зрения обеспечения потребностей судоходства.

Предложенные параметры оценки техногенного перемещения аллювия, можно признать полезными и в экологическом, и в экономическом плане; они дают материал для планирования работ на последующие годы, выбора тех перекатных участков, на которых желательно коренное улучшение судоходных условий, создание не только прорезей, но и русловыправительных сооружений.

Снижение повторяемости работ крайне важно и для сохранения водных экосистем, хотя, безусловно, транзитное дноуглубление необходимо и будет наносить определенный вред гидробионтам.

Исследования стоит продолжить по следующим направлениям. Необходимо подобрать наилучшие методы статистической оценки первичных данных (кроме средних значений возможно использование медианных, возможно применение разбивки на квартили, корреляционный анализ и т.д).

Возможно, интересные данные даст сопоставление результатов, полученных на Оби, с другими реками - Иртышом, Волгой, Белой и т.д.

Вопрос оценки степени техногенной нагрузки на всю экосистему реки от интенсивности дноуглубительных работ на перекатных участках остается, на наш взгляд, дискуссионным. Для положительного ответа на него необходимо разработать критерии нормирования. В целом же, соотнеся исследования, приведенные в данной работе с предыдущими трудами [2, 4, 5, 7], транзитное дноуглубление стоит признать весьма значимым техногенным экологическим фактором.

Наиболее сложные перекатные участки требуют внимательнейшего изучения с морфологической точки зрения: желательно осуществить их моделирование (в т.ч. математическое) позволяющее понять и устранить причины их затруднительности для судоходства.

### **Список литературы**

1. Чалов, Р.С. Параметризация условий и форм проявления русловых процессов как основа планирования дноуглубления (на примере р. Обь) / Р.С. Чалов, С.Н. Рулева,

- Н.М. Михайлова, К.М. Беркович // Речной транспорт (XXI век).2017. № 1 (81) – с. 35-43. – Текст: непосредственный.
2. Чалов, Р.С. Руслонные процессы и водные пути на реках Обского бассейна: монография/ Р.С. Чалов, Е.М. Плессевич, В.А. Баула. –Новосибирск: РИПЭЛ плюс. 2001. – 300 с. – Текст: непосредственный.
  3. Bik Yu. Environmental assessment of the estimated dredging volumes on the Ob River/ Yu. I. Bik, M. A. Buchelnikov, V. N. Kofeeva/ IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 937 (2021) 022042 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/937/2/022042
  4. Седых, В.А. Обоснование объемов дноуглубительных работ на реке Обь/ В.А. Седых, В.М. Ботвинков, Н.В. Голышев, М.А. Бучельников // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014 №1-2 – С.124-126. – Текст: непосредственный.
  5. Бучельников, М.А. Транзитные дноуглубительные работы в русле реки Оби как один из основных гидроэкологических факторов / М.А. Бучельников // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2015. №2. – С.221-224. – Текст: непосредственный.
  6. Седых, В.А. Безопасность судоходства на р. Обь на участке Новосибирская ГЭС – устье р. Томь/ В.А. Седых, А.Ю. Лапай // Речной транспорт (XXI век). 2014. № 3 (68) – С. 83-86. – Текст: непосредственный.
  7. Бучельников, М.А. Оценка экологического влияния путевых работ на речные экосистемы (на примере реки Обь): монография / М.А. Бучельников // Новосибирск: Сибир. гос. унив. водн. трансп., 2018. – 182 с. – Текст: непосредственный.
  8. Wenjie Wan, Hans-Peter Grossart, Donglan He, Wenke Yuan, Yuyi Yang, Stronger environmental adaptation of rare rather than abundant bacterioplankton in response to dredging in eutrophic Lake Nanhu (Wuhan, China), *Water Research*, Volume 190, 15 February 2021, 116751, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116751>.
  9. Xingliang Meng, Juanjuan Chen, Zhengfei Lia and etc., Degraded functional structure of macroinvertebrates caused by commercial sand dredging practices in a flood plain lake, *Environmental Pollution*, Volume 263, Part B, August 2020, 114415, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114415>.
  10. Anastasia Krainyk, Lianne M. Koczur, Bart M. Ballard, A spatial model for the beneficial use of dredge spoil deposition: Creation and management of breeding habitat for reddish egrets in Texas, *Journal of Environmental Management* Volume 260, 15 April 2020, 110022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110022>.

#### References

1. Chalov, R.S. Parametrization of conditions and forms of manifestation of channel processes as a basis for dredging planning (on the example of the Ob river) / R.S. Chalov, S.N. Ruleva, N.M. Mikhailova, K.M. Berkovich // *River transport (XXI century)*.2017. No. 1 (81) – pp. 35-43. – Text: direct.
2. Chalov, R.S. Channel processes and waterways on the rivers of the Ob basin: monograph / R.S. Chalov, E.M. Pleskevich, V.A. Baula. –Novosibirsk: RIPEL plus. 2001. – 300 p. – Text: direct.
3. Bic Yu. Ecological assessment of the estimated volumes of dredging operations on the Ob River / Yu. I. Bik, M. A. Buchelnikov, V. N. Kofeeva / IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 937 (2021) 022042 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/937/2/022042
4. Sedykh, V.A. Substantiation of dredging volumes on the Ob River/ V.A. Sedykh, V.M. Botvinkov, N.V. Golyshev, M.A. Buchelnikov // *Scientific problems of transport in Siberia and the Far East*. 2014 No.1-2 – pp.124-126. – Text: direct.
5. Buchelnikov, M.A. Transit dredging in the Ob riverbed as one of the main hydroecological factors / M.A. Buchelnikov // *Scientific problems of transport in Siberia and the Far East*. 2015. No. 2. – pp.221-224. – Text: direct.
6. Sedykh, V.A. Safety of navigation on the Ob River at the site of the Novosibirsk HPP – the mouth of the Tom River/ V.A. Sedykh, A.Yu. Lapai // *River transport (XXI century)*. 2014. No. 3 (68) – pp. 83-86. – Text: direct.

7. Buchelnikov, M.A. Assessment of the ecological impact of road works on river ecosystems (on the example of the Ob River): monograph / M.A. Buchelnikov // Novosibirsk: Sibir. gos. univ. vodn. transp., 2018. – 182 p. – Text: direct.
8. Wenjie Wang, Hans-Peter Grossart, Donglan He, Wenke Yuan, Yuyi Yang, Stronger adaptation to the environment of rare rather than abundant bacterioplankton in response to dredging in eutrophic Lake Nanhu (Wuhan, China), Water Research, Volume 190, February 15, 2021, 116751, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116751> .
9. Xingliang Meng, Juanjuan Chen, Zhengfei Lia et al., Deterioration of the functional structure of macroinvertebrates caused by the commercial practice of dredging sand in a floodplain lake, Environmental pollution, Volume 263, Part B, August 2020, 114415, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114415> .
10. Anastasia Krainik, Lianna M. Kochur, Bart M. Ballard, Spatial model for the useful use of dredger waste deposition: creation and management of the breeding habitat of reddish egrets in Texas, Journal of Environmental Management, Volume 260, April 15, 2020, 110022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110022> .

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Бик Юрий Игоревич**, д.т.н., профессор, профессор кафедры Строительного производства, конструкций и охраны водных ресурсов, Сибирский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «СГУВТ»), 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: [yibik@mail.ru](mailto:yibik@mail.ru)

**Yuriy I. Bic**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Construction Production, Structures and Protection of Water Resources, Siberian State University of Water Transport" (FSFEI HE "SSUWT") 630099, Novosibirsk, Shchetinkina str., 33, e-mail: [yibik@mail.ru](mailto:yibik@mail.ru)

**Бучельников Михаил Александрович**, к.б.н., доцент, доцент кафедры Строительного производства, конструкций и охраны водных ресурсов, Сибирский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «СГУВТ»), 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: [nsk3000@rambler.ru](mailto:nsk3000@rambler.ru)

**Mikhail A. Buchelnikov**, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction Production, Structures and Protection of Water Resources, Siberian State University of Water Transport" (FSFEI HE "SSUWT"), 630099, Novosibirsk, Shchetinkina str., 33, e-mail: [nsk3000@rambler.ru](mailto:nsk3000@rambler.ru)

**Кофеева Вера Николаевна**, старший преподаватель кафедры Строительного производства, конструкций и охраны водных ресурсов, Сибирский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «СГУВТ»), 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: [v.n.kofeeva@nsawt.ru](mailto:v.n.kofeeva@nsawt.ru)

**Vera N. Kofeeva**, Senior Lecturer of the Department of Construction Production, Structures and Protection of Water Resources, Siberian State University of Water Transport" (FSFEI HE "SSUWT"), 630099, Novosibirsk, Shchetinkina str., 33, e-mail: [v.n.kofeeva@nsawt.ru](mailto:v.n.kofeeva@nsawt.ru)

**Бобыльская Виктория Александровна**, к.т.н., доцент, доцент кафедры Строительного производства, конструкций и охраны водных ресурсов, Сибирский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «СГУВТ»), 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: [ek@ngs.ru](mailto:ek@ngs.ru)

**Viktoria A. Bobylskaya**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction Production, Structures and Protection of Water Resources, Siberian State University of Water Transport" (FSFEI HE "SSUWT"), 630099, Novosibirsk, Shchetinkina str., 33, e-mail: [ek@ngs.ru](mailto:ek@ngs.ru)

Статья поступила в редакцию 06.05.2022; опубликована онлайн 07.06.2022.  
Received 06.05.2022; published online 07.06.2022.



УДК 004.942: 504.4.054

DOI: 10.37890/jwt.vi71.266

## **Особенности численного моделирования речных потоков при анализе последствий аварий судов**

**И.В. Липатов**<sup>1</sup>

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8770-0522>

**О.Л. Домнина**<sup>1</sup>

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9098-313X>

**Д.А. Бандин**<sup>1</sup>

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2952-4882>

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

**Аннотация.** Следствием аварий с судами может быть попадание грузов и топлива в речное русло. Для прогнозирования последствий таких аварий в отдельных случаях (наличии особо охраняемых территорий, близость водозаборных сооружений и др.) необходимо учитывать гидроморфологические особенности речного русла. Одним из этапов такого учета является численное моделирование речного потока. В данной работе авторами проведен анализ особенностей такого моделирования. Для этого была составлена схема исследований, выбран математический аппарат, выбран речной участок, на примере которого авторы изучили особенности процесса моделирования. Кроме того, на основе сравнения различных подходов к моделированию процесса турбулентности сделан вывод о предпочтительности для участков с наличием затонских емкостей, застойных зон и отрывных течений моделировать не диссипацию турбулентной энергии, а удельную кинетическую энергию турбулентности. Она более корректно воспроизводит структуру потока, ускоряет процесс расчетов и дает лучшую сходимость решений. Результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы для анализа влияния особенностей речного потока на распространение загрязнений при авариях судов.

**Ключевые слова:** моделирование речных потоков; генерации расчетной сетки; математические модели; поля турбулентности

## **Peculiarities of numerical simulation of river flows in analyzing the consequences of ship accidents**

**Igor V. Lipatov**<sup>1</sup>

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8770-0522>

**Olga L. Domnina**<sup>1</sup>

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9098-313X>

**Denis A. Bandin**<sup>1</sup>

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2952-4882>

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

**Abstract.** The consequence of accidents with ships may be the ingress of cargo and fuel into the riverbed. To predict the consequences of such accidents in some cases (the presence of specially protected areas, the proximity of water intake facilities, etc.), it is necessary to take into account the hydromorphological features of the riverbed. One of the stages of such accounting is numerical modeling of river flow. In this paper, the authors have analyzed the features of such modeling. For this purpose, a research scheme was drawn up, a mathematical apparatus was selected, a river section was selected. On this example the authors have studied the features of the modeling process. In addition, based on a comparison

of different approaches to modeling the turbulence process, it is concluded that it is preferable for sites with the presence of backwater tanks, stagnant zones and breakaway flows to model not the dissipation of turbulent energy, but the specific kinetic energy of turbulence. It reproduces the flow structure more correctly, speeds up the calculation process and gives better convergence of solutions. The results obtained in this work can be used to analyze the influence of river flow characteristics on the spread of pollution in ship accidents.

**Keywords:** modeling of river flows; generation of computational grid; mathematical models; turbulence fields.

### **Введение**

Анализ динамики объемов перевозок грузов на внутренних водных путях России (далее ВВП) за 2019-2021 года показал наличие тенденции его незначительного роста [1]. В дальнейшем прогнозируется дальнейший рост объемов перевозок. Такой оптимистичный прогноз связан, с одной стороны, с запланированной реализацией мероприятий по ликвидации лимитирующих участков (строительством Багаевского гидроузла, реконструкциями судоходных шлюзов Городецкого гидроузла, созданием судоходного канала от Городца до Нижнего Новгорода) и лимитирующих условий судоходства на ВВП (организация круглогодичной навигации на ВВП южной части России) [1, 2, 3]. С другой стороны, в рамках Транспортной стратегии и концепции Федерального проекта «Внутренние водные пути», рассматривается вопрос контроля Минтрансом РФ транспортного баланса между различными видами транспорта, переориентация части грузов с автомобильных и железных дорог на внутренние водные пути.

Начало спецоперации на Украине и необходимость перестроения логистических потоков грузов России также может привести к росту объема перевозок грузов по ВВП [4].

Вместе с тем, увеличение грузопотоков может привести и к росту аварий с судами. Их следствием может быть попадание грузов и топлива в речное русло. Для прогнозирования последствий таких аварий и разработке мероприятий по защите от загрязнения с учетом таких внешних факторов, как гидроморфологические особенности речного русла, используется численное моделирование. Особенно важно учитывать эти особенности при разработке мероприятий по защите водозаборных сооружений, особо охраняемых территорий, в районе расположения атомных электростанций и других случаях [5].

Данная работа является частью уже выполненных исследований авторов [6], за рамкой которых оказался не описанным вопрос особенностей численного моделирования речных потоков. На результатах этого моделирования возможно уже определение шлейфов распространения загрязнений в результате аварий.

Теоретические обоснования использования математического аппарата уже были рассмотрены в работах [6, 7, 8]. Но за пределами данных работ оказался вопрос исследования схемы реализации CAD/CAE вычислительной технологии.

Таким образом, целью данной работы является исследование особенностей математического моделирования речных потоков.

Для достижения этой цели авторами были сформулированы следующие задачи:

- обоснование выбора участка для моделирования;
- разработка схемы исследования особенностей математического моделирования речных потоков с использованием CAD/CAE вычислительной технологии;
- выбор математического аппарата для процесса моделирования;

- моделирование речных потоков выбранного участка с помощью CAD/CAE вычислительной технологии;
- анализ полученных результатов.

### Материалы и методы

Схема исследования речного участка показана на рис. 1.

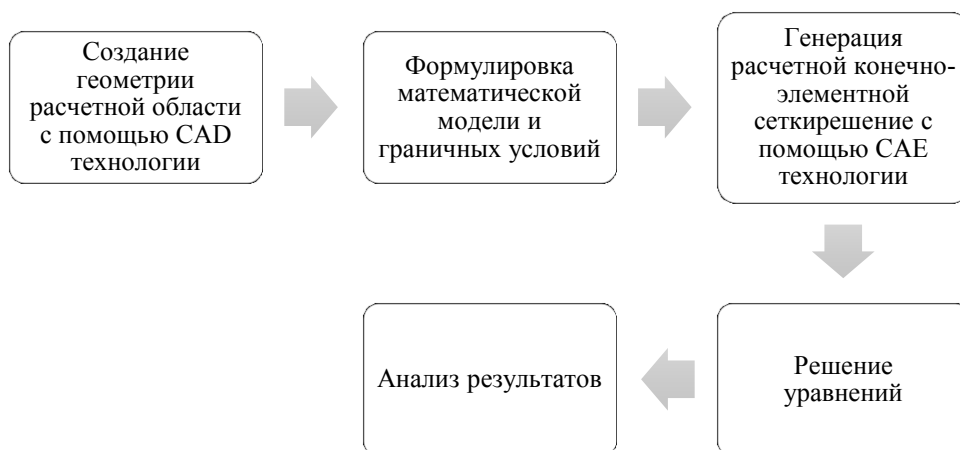


Рис. 1. Схема реализации CAD/CAE вычислительной технологии

Для описания математической модели была использована система гидродинамических уравнений Навье-Стокса, дополненная уравнением неразрывности [7, 9]. Неизвестными в этой системе становятся значения функции, описывающие кинематическую структуру потока, действующие в центре каждого контрольного объема сообразно разбивки расчетной контрольно-объемной сетке. Граничные и начальные условия для моделей речного русла представлены в работах [7, 8, 9].

С учетом существующего парка программных продуктов для реализации CAD/CAE математического моделирования наиболее сложными на практике остаются этапы генерации расчетной сетки и подбор математических моделей описания поля турбулентности в речном потоке. Поэтому именно этим аспектам и посвящено данное исследование.

В соответствии с существующими подходами используются два технологических подхода к генерации расчетной сетки. Первый базируется на Евклидовом подходе. Он включает в себя последовательное формирование геометрического образа на основе опорных точек. Затем точки соединяются в линии. Линии формируют поверхности, а уже поверхности складываются в объемные фигуры и формируют пространственный образ предмета. Второй подход к формированию геометрии образа базируется на Булевой алгебре. Взяв за основу любой трехмерный объект, мы последовательно отсекаем от него лишние детали, пока не получим нужный нам образ. Образно этот подход был описан великим скульптором Микеланджело Буонарроти. На вопрос зрителя о том, как он создает свои великие творения, маэстро ответил: «Да нет ничего проще, берешь подходящую по размерам глыбу и отсекаешь некоторые лишние

детали... » [10]. Математически эти операции были формализованы английским математиком Джоном Булем, в результате чего подход и получили свое название.

Евклидов подход на практике реализуется на основе блочной концепции. Задавшись восемью опорными точками, пространство описывают в виде блока, задаваемого в соответствии с концепцией. Но на практике приходится реализовывать многоблочный подход, и разбивка сетки выполняется в два этапа [9, 11]. На первом этапе расчетная область разбивается на несколько блоков. На втором этапе для каждого полученного блока строится сетка. В зависимости от того генерируется регулярная или нерегулярная сетка, либо они состыковываются точно по поверхностям раздела, либо не состыковываются.

При состыковке блоков используется технология иерархических блочных структур (когда нижестоящие по иерархии сетки погружаются в вышестоящие) [7]. При этом использование иерархических блочных структур подразумевает локальное изменение сетки в отдельных областях.

Практика использования Евклидова подхода к решению задач речной гидродинамики показала ее нежизнеспособность. В первую очередь это связано с тем, что живые сечения речного потока тяжело сводятся к четырем узловым плоскостям. Помимо этого, геометрия речного русла формируется специфическими мезаформами (перекат, седловина, терраса и т.д.) и практически не аппроксимируются простейшими геометрическими плоскостями. Дальнейшее изучение вопроса формирования расчетных сеток для моделирования речных русел потребовало пересмотра подхода к формированию сеточных моделей в сторону Булевого подхода на основе твердотельных геометрических моделей.

Анализ источников показал, что для генерации расчетных сеток в границе замкнутого твердого геометрического тела лучше всего использовать метод «фронтального продвижения» [11]. Этот метод предполагает выполнение генерации сетки в следующей последовательности:

1. Импорт геометрии и подготовка поверхности.
2. Создание поверхности.
3. Создание поверхностной сетки.
4. Создание внутренней объемной сетки.
5. Экструзия слоев и окончательная сборка всей сетки.

Далее для практической реализации математического моделирования речных потоков необходим выбор математической модели для описания турбулентных эффектов в потоке жидкости.

Здесь были использованы так называемые  $k - \varepsilon$  и  $k - \omega$  подходы к моделированию турбулентности.

В соответствии с  $k - \varepsilon$  подходом коэффициент турбулентной вязкости (коэффициент турбулентного обмена) определялся по формуле:

$$\nu_T = c_\rho \cdot \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (1)$$

где  $k$  – кинетическая энергия турбулентности,

$\varepsilon$  – коэффициент диссипации турбулентной кинетической энергии.

$c_\rho$  – кинетическая энергия турбулентности,

Кинетическая энергия турбулентности и ее диссипация (рассеивание) в потоке являются основными количественными характеристиками турбулизации речного потока, так как напрямую связаны с турбулентными касательными напряжениями в

потоке. Для их численного определения возникает необходимость в дополнении системы уравнений Навье-Стокса группой уравнений, описывающих значения  $k$  и  $\varepsilon$  в области потока. В частности, такой подход позволяет по отдельности считать турбулентность в ядре потока, где она полностью развивается. Параллельно с этим для пристеночных областей, в случае необходимости, использовать соответствующие переходные законы-функции пристеночных переходов. Эти функции, несмотря на свою простоту, достаточно надежно обеспечивают устойчивость расчетной процедуры и получение достоверного результата.

Дополнительно авторами также был рассмотрен и  $k - \omega$  подход. Обе эти модели весьма близки друг к другу. Только в первом случае определяется диссипация кинетической энергии потока, а во втором удельная кинетическая энергия турбулентности. Величина турбулентной вязкости для  $k - \omega$  модели определяется по формуле аналогичной формуле (1), с той лишь разницей, что вместо диссипации кинетической энергии используется удельная кинетическая энергия турбулентности и соответствующая константа турбулентности.

По сути, во втором подходе к моделированию турбулентности мы от реальных величин переходим к их безразмерной нормировке. В результате функция турбулентного поля становится более плавной и позволяет более устойчиво прописывать поведение потока при изгибах, на поворотах и существенных искривлениях оси потока за счет более точного описания завихренностей и циркуляций в потоке. Таким образом, в случае наличия в потоке большого количества вихрей различного масштаба и ориентации,  $k - \omega$  модель более плавно и, как результат, более физично, воспроизводит кинематическую структуру потока. Наиболее популярный вариант  $k - \omega$  модели турбулентности формулируется следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(pk) + \frac{\partial}{\partial x_i}(pk u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \\ \frac{\partial}{\partial t}(p\omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(p\omega u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \end{aligned} \quad (2)$$

где:  $G_k$  - генерация кинетической энергии турбулентности осредненным течением;

$G_\omega$  - генерация удельной диссипации кинетической энергии турбулентности;

$\Gamma_k, \Gamma_\omega$  - эффективная диффузия для  $k$  и  $\omega$ , соответственно;

$Y_k, Y_\omega$  - диссипацию  $k$  и  $\omega$  под воздействием турбулентности,

$S_k, S_\omega$  - источниковые члены, определяемые пользователем.

Для изучения особенностей моделирования речных потоков на основе выполненных ранее работ [5, 6] был выбран участок 894 - 900 км в районе Нижнего Новгорода. Выбор участка был сделан исходя из следующих обстоятельств:

- он относится к группе повышенного риска исходя из статистических данных за 2007-2018 годы;
- имеет характерные проявления активных турбулентных процессов (устойчивый звуковой фон, активный русловой процесс, переменные боковые и донные деформации, активные турбулентные зоны с вертикальной осью вращения, появляющиеся и исчезающие боковые области локальной циркуляции потока).

### Результаты

На этапе импорта исходной твердотелой CAD геометрии (рис.2) в САЕ пакет происходит подготовка внешней поверхности к созданию сетки. В это время добиваются, чтобы она вся состояла из равнобедренных треугольных элементов с одновременным упором на сохранение соотношений размеров сторон будущих элементов (рис.3).

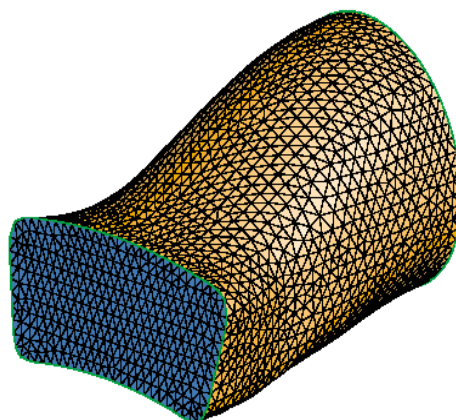


Рис. 2. Импортированная (исходная) поверхность расчетной области

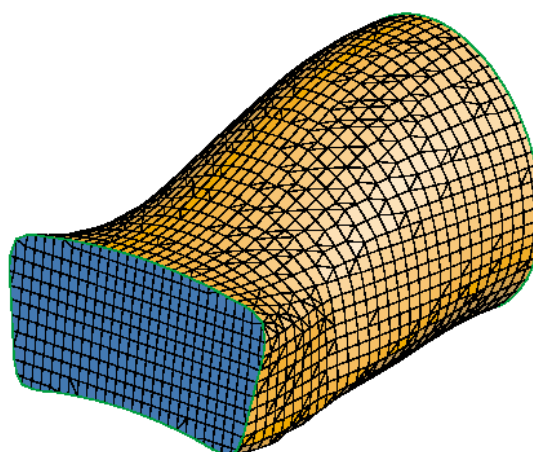


Рис. 3. Созданная поверхность расчетной области с линейными ячейкам.

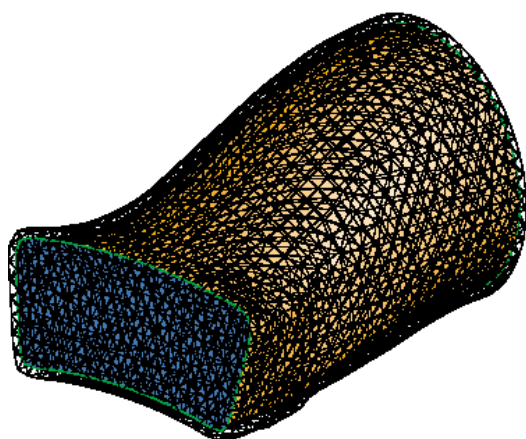


Рис. 4. Новая поверхность после выглаживания

При создании поверхностной сетки (рис.3) было выполнено моделирование пристеночных турбулентных зон в случае необходимости. Для этого была зарезервирована пристеночная область для дальнейшего заполнения специальными элементами, вытянутыми вдоль контура поверхности. Контур этой области описывались с помощью внешней поверхности и внутренней под поверхности (рис. 5).

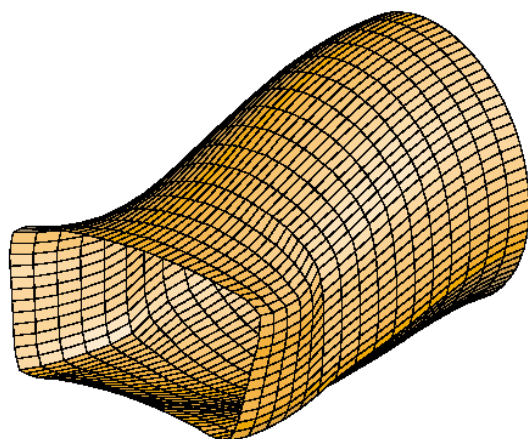


Рис. 5. Комбинирование исходной и экструдированной под поверхности

В процессе генерации расчетных ячеек в основной расчетной области с помощью моделирования была сформирована ортонормируемая сетка высокого качества. Для этого все ячейки, выходящие за границу расчетной области, были выявлены и уничтожены. Для повторения оставшимся ячейками формы расчетной области, все ячейки, которые частично входят в расчетную область и частично вылетают за ее контур, были проецированы по нормали на выглаженные поверхности (рис.6).

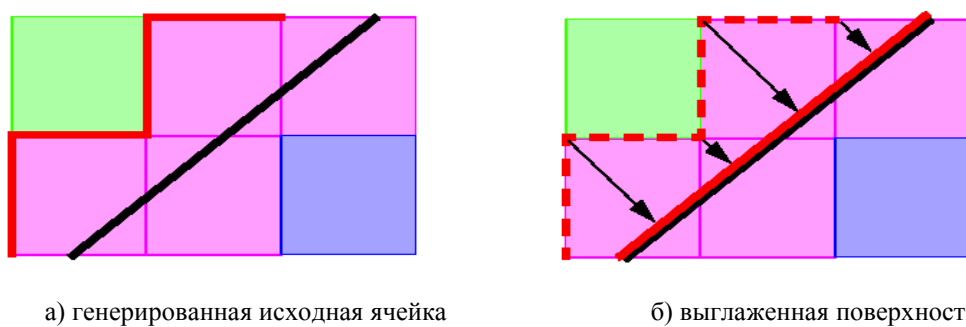


Рис. 6. Выглаживание расчетной области в районе границы поверхности

На последнем этапе обратного экструдирования ячеек внутренней поверхности сетки в соответствии с параметрами исходной сетки происходит формирование расположенных послойно наборов ячеек в непосредственной близости от поверхности стенки. Для этого между внутренней сеткой и поверхностью используются прямые линии (см. рис. 7).

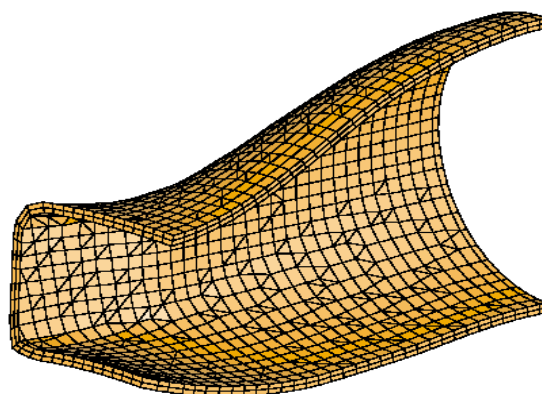


Рис. 7. Экструдирование слоя для объемной сетки

Результаты работы двух последних этапов объединяются и на выходе получается расчетная сетка  $\Gamma$  для выполнения расчета (см. рис. 8).



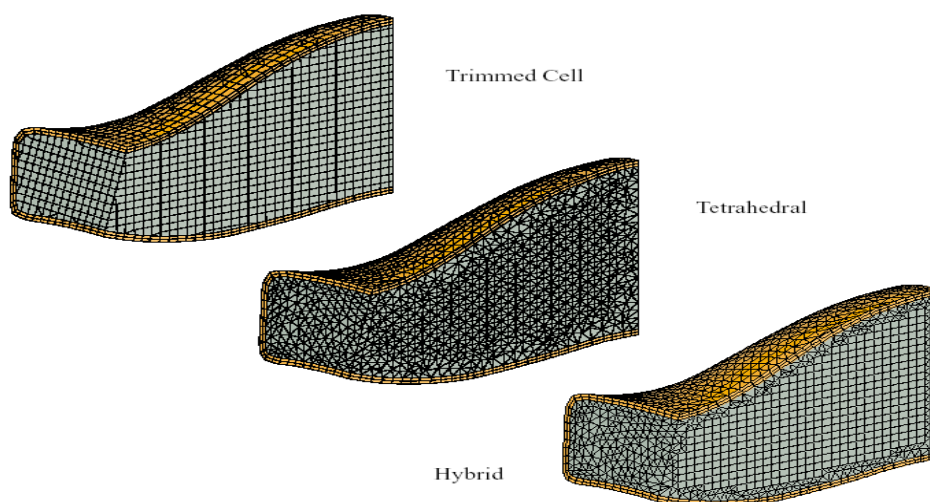
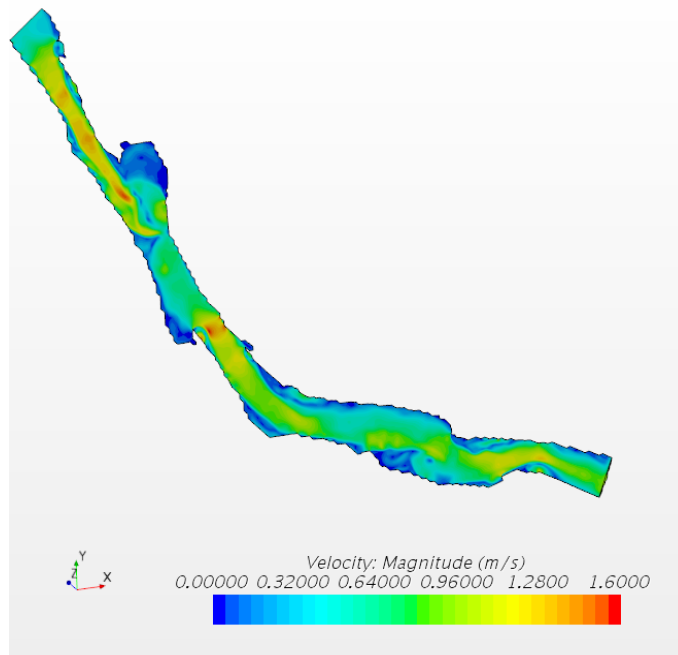


Рис. 8. Объединение объемной и экструдированной сетки

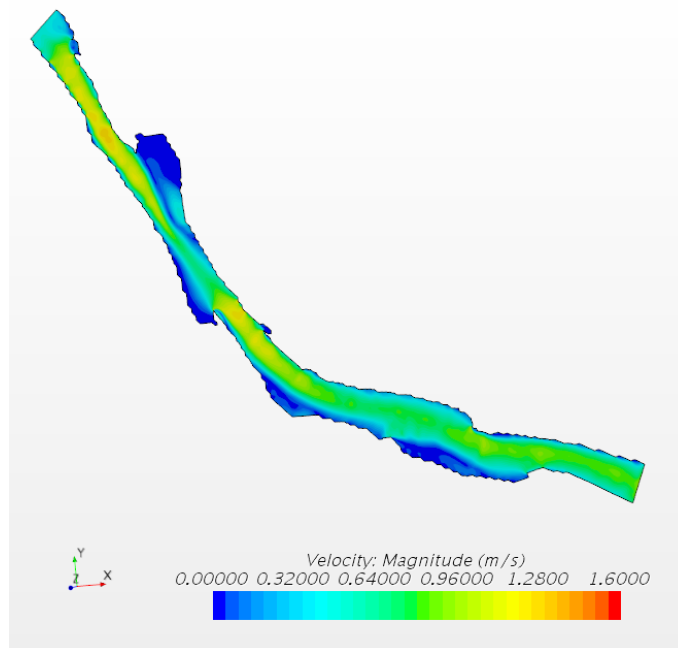
Несмотря на громоздкость алгоритма реализации расчетной процедуры, последний характеризуется высокой устойчивостью и надежностью, что будет показано на конкретном примере моделирования участка реки.

Анализ различий при использовании различных гипотез турбулентности иллюстрирует рис. 10. В качестве испытательного используются три Ревяжских переката расположенные выше по течению от Борского моста, в черте города Нижнего Новгорода.

Как видно из рис.9, качественные особенности структуры потока при различных математических моделях турбулентности неизменны. Различия проявляются в количественных параметрах скоростей течения. В обоих случаях наблюдаются экстремумы скоростей течения в границах Верхнего, Среднего- и Нижнего Ревяжских перекатов. Но в случае использования  $k - \varepsilon$  гипотезы турбулентности максимумы скоростей несколько выше. Как уже ранее говорилось, это связано с тем, что  $k - \varepsilon$  гипотеза турбулентности оперирует со скоростью диссипации турбулентной энергии, а  $k - \omega$  модель турбулентности с удельной диссипацией турбулентной энергии. В результате последняя более тщательно просчитывает циркуляционные составляющие скоростей потока и в окончательном решении поток получает более плавные переходы в турбулентных зонах, что более похоже на наблюдаемую в природе картину.



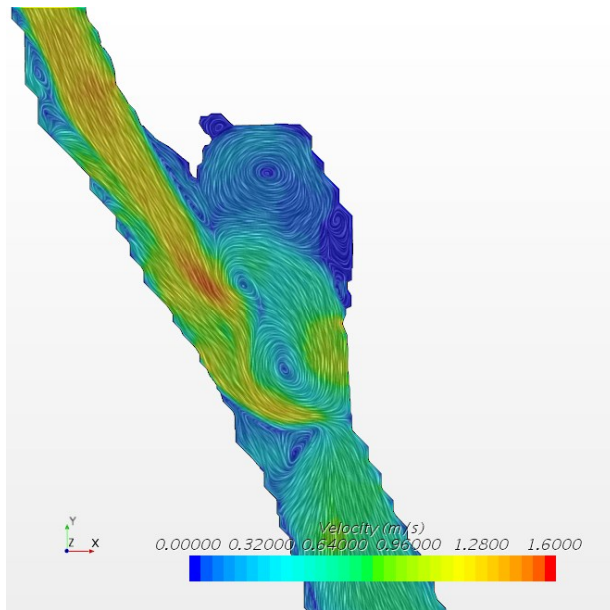
а)  $k - \epsilon$  гипотеза турбулентности



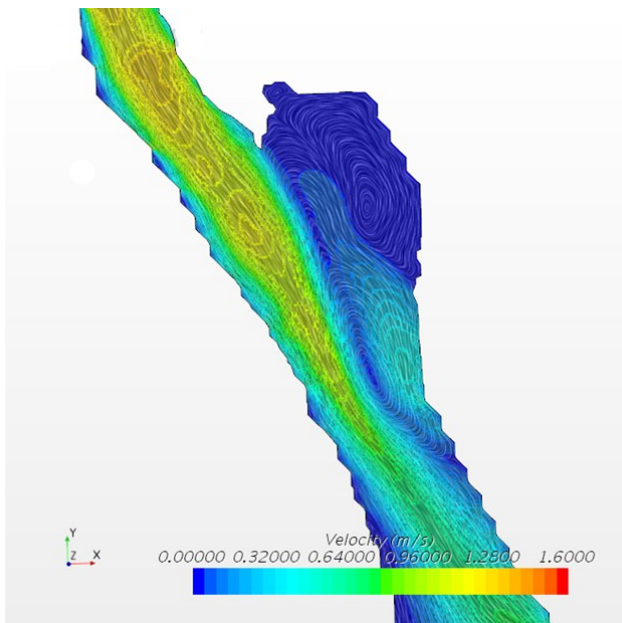
б)  $k - \omega$  гипотеза турбулентности

Рис. 9. Поверхностные скорости речного потока при использовании различных гипотез турбулентности

Для более дискретного изучения структуры потока на рис. 10 представлены структуры потока в районе затонской емкости верхнего переката.



а)  $k - \epsilon$  гипотеза турбулентности



б)  $k - \omega$  гипотеза турбулентности

Рис. 10. Кинематическая структура потока в затонской емкости в окрестности Верхнего Ревяжского переката

В случае использования  $k - \varepsilon$  гипотезы турбулентности как в русле, так и в затонской емкости наблюдается большое количество турбулентных вихрей. Причем, один из вихрей на выходе из Верхнего Ревяцкого переката сжимает почти половину живого сечения речного потока. Корректность такого решения вызывает большое сомнение. Альтернативный вариант с  $k - \omega$  моделью турбулентности воспроизводит поток более плавно, и в затонской емкости выделяется меньшее количество вертикальных вихрей. Причем по всей длине потока сохраняется классическая эпюра скоростей как по свободной поверхности, так и по глубине.

### Обсуждение

Традиционно, при реализации CAD/CAE вычислительных технологий математического моделирования гидродинамических процессов, наиболее сложным этапом является разбивка расчетной сетки. Применительно к задачам речной гидродинамики эта процедура осложняется тем, что реки имеют вытянутый линейный размер (по оси течения), и квазиовальный контур по живому сечению реки. Последнее является следствием того, что контур живого сечения реки формируется горизонтальной линией свободной поверхности воды и крайне распластанным, квазипараболическим контуром донной поверхности. Причем из-за специфики топологии урезной зоны реки угол между этими двумя линиями часто вырождается в очень острый угол. Таким образом, даже в случае применения иерархических структур, разбить качественную сетку в рамках Евклидовой геометрии через блоки не представляется возможным.

Намного лучше обстоят дела в случае применения Булевого подхода. Как показала практика авторов статьи, метод фронтального продвижения позволяет генерировать достаточно качественные расчетные сетки для реализации процедуры математического моделирования речного потока, и проводить исследования последствий техногенных аварий на реках на принципиально ином уровне.

Второй существенной проблемой при моделировании речных потоков является “замыкание” системы уравнений Навье-Стокса с целью корректного учета турбулентности в речном потоке. При учете турбулентности в речном потоке работа с  $k - \varepsilon$  или  $k - \omega$  аналитической гипотезой более удобна чем прямой учет касательных турбулентных напряжений, так как позволяет существенно упростить натурные измерения и избавиться от ряда математических сложностей при численной реализации вычислительной процедуры. Но моделирование речного потока с помощью  $k - \varepsilon$  подхода имеет существенный недостаток, связанный с тем, что он не всегда корректно воспроизводит крупные вертикальные вихри. Если при моделировании прямолинейных участков этот недостаток не критичен, то при моделировании затонских емкостей, застойных зон и отрывных течений качественные показатели кинематической структуры потока речного потока начинают существенно разниться с натурными данными.

На основании выполненных расчетов можно сделать вывод о том, что в случае присутствия в потоке большого числа вихрей разновекторной направленности предпочтительнее моделировать не диссипацию турбулентной энергии, а удельную кинетическую энергию турбулентности, то есть использовать  $k - \omega$  модель турбулентности. Помимо того, что она более корректно воспроизводит структуру потока, расчетная процедура является более устойчивой и сходимость решения (получение окончательного решения) выполняется быстрее.

### **Заключение**

Таким образом, авторами в данной работе были получены следующие результаты:

- показана возможность применения вычислительных технологий CAD/CAE для исследования особенностей математического моделирования речных потоков ;
- разработана схема математического моделирования речных потоков с использованием CAD/CAE вычислительной технологии;
- выбран математический аппарат для процесса моделирования;
- обоснован участок для моделирования речных потоков;
- сгенерирована сетки выбранного речного участка;
- выявлены особенности моделирование речных потоков выбранного участка с помощью различных гипотез турбулентности и выявлена.

Проведенный анализ может быть полезен при разработке комплексной автоматизированной системы определения экологического ущерба при авариях судов на ВВП и при разработке защитных мероприятий для снижения размеров экологического вреда, что и будет являться предметом дальнейших исследований авторов.

### **Список литературы**

1. Андрей Лаврищев "Навигация 2022 года ожидается непростой"//[https://www.korabel.ru/news/comments/glava\\_rossmorrechflota\\_navigaciya\\_2022\\_goda\\_ozhidaetsya\\_neprosto.html](https://www.korabel.ru/news/comments/glava_rossmorrechflota_navigaciya_2022_goda_ozhidaetsya_neprosto.html) (дата обращения 02.05.2022)
2. О Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года / Распоряжение Правительства РФ от 27 ноября 2021 г. № 3363-р.
3. Инфраструктурные проекты на внутреннем водном транспорте// [https://morflot.gov.ru/deyatelnost/rechnoy\\_flot/infrastrukturnye\\_proekty\\_na\\_vnutrennem\\_vodnom\\_transporte.html](https://morflot.gov.ru/deyatelnost/rechnoy_flot/infrastrukturnye_proekty_na_vnutrennem_vodnom_transporte.html) (дата обращения 02.05.2022)
4. Эксперты спрогнозировали срок восстановления грузоперевозок в России// <https://iz.ru/1325102/2022-04-23/eksperty-sprognozirovali-srok-vozstanovleniia-gruzoperevozok-v-rossii> (дата обращения 02.05.2022)
5. Домнина О.Л. Оценка риска экологических последствий от транспортных происшествий с сухогрузными судами на примере Волжского бассейна// Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1. №1 (55).С.187-193
6. Домнина О.Л., Липатов И.В., Влияние гидроморфологических особенностей речного русла на характер распределения шлейфа загрязнения нефтью при авариях судов, Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т.1. N 2 (56). С. 151-160
7. Липатов И.В. Гидродинамика речных потоков и ее влияние на эксплуатационные параметры судоходных гидротехнических сооружений. - Н.Новгород: Изд-во ФГОУ ВПО ВГАВТ, 2006. – 96 с.
8. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
9. Sajid Zaman; Khan Faisal; Veitch Brian Dynamic ecological risk modelling of hydrocarbon release scenarios in Arctic waters, Marine pollution bulletin, Volume 153. p.111001; (2020) doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111001
10. Цитаты известных личностей// <https://ru.citaty.net/tsitaty/457936-mikelandzhelobuonarroti-ia-beru-kamen-i-otsekaiu-vsio-lishnee/>
11. Шмакова М.В. Гидравлические сопротивления в математическом моделировании речных потоков. Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2015. № 40. С. 46-54.

**References**

1. Andrey Lavrishchev "Navigation in 2022 is expected to be difficult"//[https://www.korabel.ru/news/comments/glava\\_rosmorrechflota\\_navigaciya\\_2022\\_goda\\_ozhidaetsya\\_neprosto.html](https://www.korabel.ru/news/comments/glava_rosmorrechflota_navigaciya_2022_goda_ozhidaetsya_neprosto.html)
2. On the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period until 2035 / Decree of the Government of the Russian Federation of November 27, 2021 No. 3363-р.
3. Infrastructure projects in inland water transport// [https://morflot.gov.ru/deyatelnost/rechnoy\\_flot/infrastrukturnyie\\_proektyi\\_na\\_vnutrennem\\_vodnom\\_transporte.html](https://morflot.gov.ru/deyatelnost/rechnoy_flot/infrastrukturnyie_proektyi_na_vnutrennem_vodnom_transporte.html) (Accessed 02.05.2022)
4. Experts predicted the period for the restoration of cargo transportation in Russia
5. Olga L. Domnina, Risk Assessment of Environmental Consequences from Transport Accidents with Dry Cargo Vessels on the Example of the Volga Basin. Marine intellectual technologies. 2022. № 1 (55) V.1. pp. 187-193
6. Olga L. Domnina, Igor V. Lipatov, The Influence of Hydromorphological Features of the River Channel on the Distribution of the Oil Pollution Plume during Ship Accidents, Marine intellectual technologies. 2022. Part.1, № 2 (56). pp. 151-160.
7. Lipatov I.V. Hydrodynamics of river flows and its influence on the operational parameters of navigable hydraulic structures. - N.Novgorod: Publishing House of FGOU VPO VГАVТ, 2006. - 96 p.
8. Patankar S. Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics / Per. from English. – M.: Energoatomizdat, 1984. – 152 p.
9. Sajid Zaman Khan Faisal; Veitch Brian Dynamic ecological risk modeling of hydrocarbon release scenarios in Arctic waters, Marine pollution bulletin, Volume 153. p.111001; (2020) doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111001
10. Quotes of famous personalities// <https://ru.citaty.net/tsitaty/457936-mikelandzhelo-buonarroti-ia-beru-kamen-i-otsekaiu-vsio-lishnee/>
11. Shmakova M.V. Hydraulic resistance in mathematical modeling of river flows. Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University. 2015. No. 40. S. 46-54.

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

**Липатов Игорь Викторович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры водных путей и гидросооружений, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Н.Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: [i\\_lipatov@mail.ru](mailto:i_lipatov@mail.ru)

**Домнина Ольга Леонидовна**, кандидат технических наук, доцент, научный секретарь, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Н.Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: [o-domnina@yandex.ru](mailto:o-domnina@yandex.ru)

**Бандин Денис Алексеевич**, магистрант, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Н.Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: [kaf\\_vpgs@vsuwt.ru](mailto:kaf_vpgs@vsuwt.ru)

**Igor V. Lipatov**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Waterways and Hydraulic Structures, Volga State University of Water Transport, 603950, N. Novgorod, Nesterova str., 5, e-mail: [i\\_lipatov@mail.ru](mailto:i_lipatov@mail.ru)

**Olga L. Domnina**, Ph.D.(Eng), assistant professor, Scientific Secretary, Volga State University of Water Transport, Nesterovast., 5, N. Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: [o-domnina@yandex.ru](mailto:o-domnina@yandex.ru)

**Denis A. Bandin**, undergraduate, Volga State University of Water Transport, Nesterovast., 5, N. Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: [kaf\\_vpgs@vsuwt.ru](mailto:kaf_vpgs@vsuwt.ru)

Статья поступила в редакцию 04.05.2022; опубликована онлайн 07.06.2022.  
Received 04.05.2022; published online 07.06.2022.

## **ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

УДК 004.942: 504.4.054

DOI: 10.37890/jwt.vi71.267

### **Моделирование процессов распространения загрязнения при аварии сухогрузных судов**

**О.Л. Домнина<sup>1</sup>**

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9098-313X>

**И.В. Липатов<sup>1</sup>**

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8770-0522>

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

**Аннотация.** Загрязнения, происходящие с сухогрузными судами, могут сопровождаться серьезными экологическими последствиями. При этом объектом анализа стали аварии с сухогрузными судами, перевозящими техническую соль. Их последствия могут быть связаны с растворением соли в речном водоеме, образованию примесей и их взаимодействию с фоновыми загрязняющими веществами. Как следствие, это может приводить к усилению коррозии водозаборных сооружений, увеличению возможных экологических убытков. Данная работа является продолжением работ авторов, связанных с распространением загрязнений от транспортных происшествий на внутренних водных путях, оценкой экологического риска таких происшествий. Все это говорит о необходимости моделирования процессов распространения загрязняющих веществ при прогнозировании последствий таких аварий. В данной работе был выбран участок в районе 911 - 913 км р. Волги. Моделирование осуществлялось с помощью программного комплекса FlowVision. В статье показаны этапы проведенного моделирования процесса распространения загрязнения с учетом скорости речного потока, диаметра частиц загрязнения и химических реакций, наступающих при попадании груза в воду. Выявлены области концентрации отложений загрязнений, что позволит в будущем предложить оптимальную схему участка для оздоровления его экологии, а также уточнить методику прогнозируемого экологического ущерба.

**Ключевые слова:** транспортные происшествия; сухие грузы; моделирование загрязнения; аварии сухогрузных судов; водный транспорт

### **Modeling of pollution expansion processes in case of dry cargo ship accidents**

**Olga L. Domnina<sup>1</sup>**

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9098-313X>

**Igor V. Lipatov<sup>1</sup>**

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8770-0522>

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

**Abstract.** Pollution occurring with dry cargo ships can be accompanied by serious environmental consequences. At the same time, the object of the analysis was accidents with dry cargo ships carrying technical salt. Their consequences may be connected with the dissolution of salt in a river reservoir, the formation of impurities and their interaction with

background pollutants. As a consequence, this can lead to increased corrosion of water intake structures, an increase in possible environmental losses. This work is a continuation of the authors' work related to the spread of pollution from transport accidents on inland waterways, assessment of the environmental risk of such accidents. All this suggests the need to model the processes of the spread of pollutants in predicting the consequences of such accidents. In this work, a site was selected in the area of 911 -913 km of the Volga River. Modeling was carried out using the FlowVision software package. The article shows the stages of the modeling of the pollution expansion process taking into account the speed of the river flow, the diameter of the pollution particles and chemical reactions occurring when the cargo enters the water. The areas of concentration of pollution deposits have been identified, which will allow in the future to propose an optimal scheme of the site for improving its ecology, as well as to clarify the methodology of predicted environmental damage.

**Keywords:** transport accidents; dry cargo; pollution modeling; dry cargo ship accidents; water transport

### **Введение**

Загрязнение, происходящее в результате аварий с сухогрузными судами, может приводить к тяжелым экологическим последствиям на прилегающих территориях [1,2,3]. В зависимости от перевозимого груза, географических особенностей водного участка, наличия поблизости водозабора, находящегося рядом с населенным пунктом и других условий последствия таких аварий могут быть весьма существенными [3]. Так, при авариях с судами, перевозящими техническую соль, могут приводить к усилению коррозии водозаборных сооружений, перемешиванию и растворению ее в речном водоеме, образованию примесей и их взаимодействия с фоновыми загрязняющими веществами. Сказанное обуславливает необходимость при прогнозировании последствий таких аварий моделировать процессы распространения загрязняющих веществ [4 – 14].

Моделированию экологических последствий сбросов опасных грузов при эксплуатации судов посвящен ряд работ, но все они в основном, посвящены моделированию разливов нефти на море [4 – 13] или на внутренних водных путях [14 – 17]. Моделированию распространения загрязнения сухих грузов на внутренних водных путях уделено недостаточное внимание.

Вместе с тем, как отмечено в работе [13], ежегодно более 2,15 миллиона тонн навалочных грузов могут попадать в водную среду.

Необходимо также отметить, что в практике оценки экологических последствий используются в основном консервативные подходы к оценке зоны загрязнения [18]. Вместе с тем, полученные по консервативным подходам данные о загрязнении могут отличаться от данных, полученных при моделировании загрязнения с учетом русловых особенностей, скорости течения, химических реакций при попадании груза в воду. Для современных задач уже недостаточно определить экстремальные значения негативных факторов и их местоположение в пространстве. Поэтому представляется актуальным проведение анализа распространения загрязнения сухим грузом в случае аварии судна с помощью методов математического моделирования.

Данное исследование является логическим продолжением более ранней работы, выполненной с участием авторов [19,20].

Целью данной работы является математическое моделирование процессов распространения технической соли в границах одного из участков Волжского бассейна.

Для достижения этой цели авторами были сформулированы следующие задачи:

- обосновать выбор участка для анализа;



- провести моделирование процесса размывания твердых, нерастворимых частиц при попадании их в речной участок при авариях с технической солью и смесями;
- провести моделирование возможных вариантов распространения шлейфа консервативных и неконсервативных веществ при попадании их в речной поток при авариях с судов при перевозке технической соли.
- проанализировать полученные результаты.

### **Материалы и методы**

Для выполнения процессов моделирования на основе проведенных ранее исследований [12] был выбран участок с умеренным риском в районе 911 - 913 км. Участок выбран в силу его расположения рядом с таким крупным городом на Волге как Нижний Новгород и возможными экологическими последствиями для города. Кроме того, данный участок включает основное русло и затон как единую систему. Поэтому представляет интерес рассмотрения в ней процесса переноса загрязняющих веществ.

Процесс моделирования выполнялся в несколько этапов:

1. Создание геометрии расчетной области.
2. Формулировка математической модели и граничных условий.
3. Генерация расчетной конечно-элементной сетки.
4. Решение уравнений математической модели.
5. Анализ полученных результатов.

Моделирование осуществлялось с помощью программного комплекса FlowVision. Этот пакет используется для анализа на транспорте и в окружающей среде и позволяет решать уравнения Навье-Стокса с учетом таких факторов, как турбулентность, перенос дисперсных примесей и химических реакций между грузом и окружающей средой.

Область решения (пространство течения речного потока) формировалась на базе твердотельной геометрической CAD модели. Последняя создавалась на основе натуральных данных, полученных с изыскательской русловой партии. Данные были получены в виде текстового файла, представляющего собой набор точек, с тремя координатами (x, y, z). После импортирования было создано облако точек на видовом экране. Каждая из точек занимает свое положение относительно своих координат в пространстве.

По облаку точек строится цифровая поверхность рельефа (ЦМР) дна. После ее создания была разработана твердотельная модель участка, которая в дальнейшем позволила импортировать модель в программный комплекс.

Традиционно отправной точкой описания любых гидродинамических процессов является решение полной системы дифференциальных уравнений Навье-Стокса [20]:

$$\begin{aligned}
 \frac{dV_x}{dt} - \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right) &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \\
 \frac{dV_y}{dt} - \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} \right) &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} \\
 \frac{dV_z}{dt} - \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \\
 \frac{dV_z}{dx} + \frac{dV_z}{dy} + \frac{dV_z}{dz} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial t}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где:  $v_x, v_y, v_z$  – компоненты скоростей в проекции на соответствующую ось;  
 $P$  – давление в конкретной точке потока;  
 $\nu$  – эффективная вязкость, определяемая выражение:

$$\nu = \nu_k + \nu_t \tag{2}$$

где:  $\nu_k$  – кинематическая вязкость среды;  
 $\nu_t$  – турбулентная вязкость (коэффициент турбулентного обмена). Наиболее распространенным способом описания этой величины является  $k - \epsilon$  подход. Согласно ему, величина коэффициента турбулентного обмена определяется по формуле:

$$\nu_t = c_p \cdot \frac{k^2}{\epsilon} \tag{3}$$

где:  $k$  – кинетическая энергия турбулентности;  
 $c_p$  – турбулентная константа среды;  
 $\epsilon$  – диссипация турбулентной энергии.

Последние две величины, в свою очередь, определяются по своим математическим моделям, наиболее популярной из которых является модель второго порядка Джонсона – Лаундера.

При моделировании осуществлялось варьирование скорости потока от 0.1 до 2 м/с, моделирование размыва нерастворимых частиц с помощью подхода Лагранжа, реакции растворения при попадании соли в воду.

### Результаты и обсуждение

При создании геометрии расчетной области были использованы натурные данные, полученные с промерного комплекса изыскательского судна русловой партии № 25 Нижегородского района водных путей и судоходства. Изыскания включали съемку рельефа дна реки движением промерного судна по галсам. Впоследствии полученные данные о глубинах и плановом положении точек замера в глобальной системе координат (рис.1) интерполировались на равномерную сетку и экспортировались в пакет формирования твердотельной модели (рис.2). Файл экспорта представляет собой текстовый файл. В нем точки поверхности земли (дно реки и примыкающие берега) фиксировались в виде трехмерного массива (рис. 1).

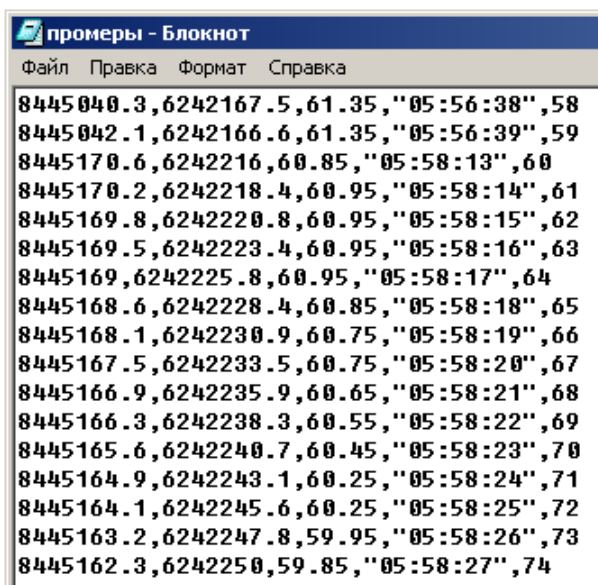


Рис. 1. Результаты промеров участка 910-913 км реки Волги

На следующем этапе, в графическом пакете *Civil AutoCAD* по опорным точкам была сформирована поверхность территории русла с прилегающими территориями в виде 3D плоскости. Впоследствии плоскость с помощью Булевых операций трансформировалась в твердотельную модель исследуемого участка русла (рис. 2).

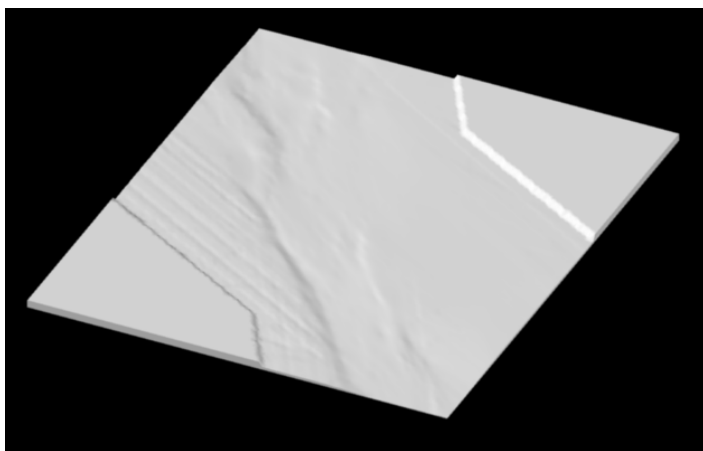
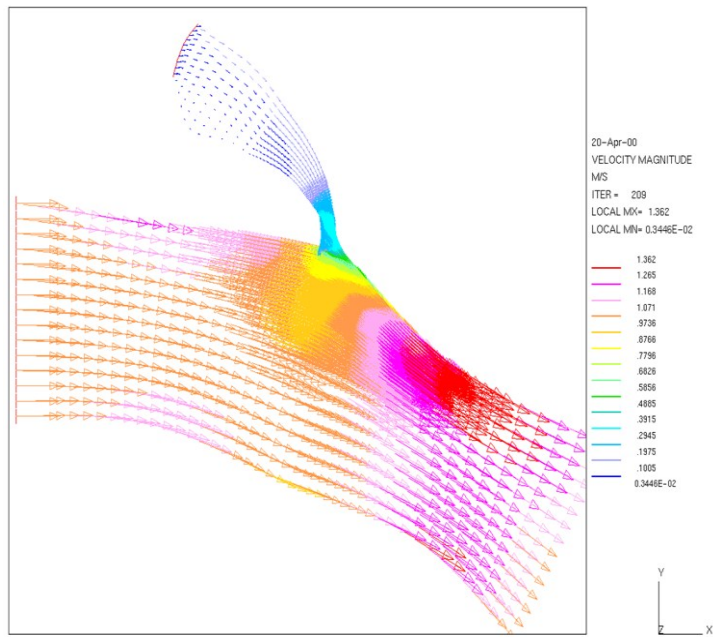
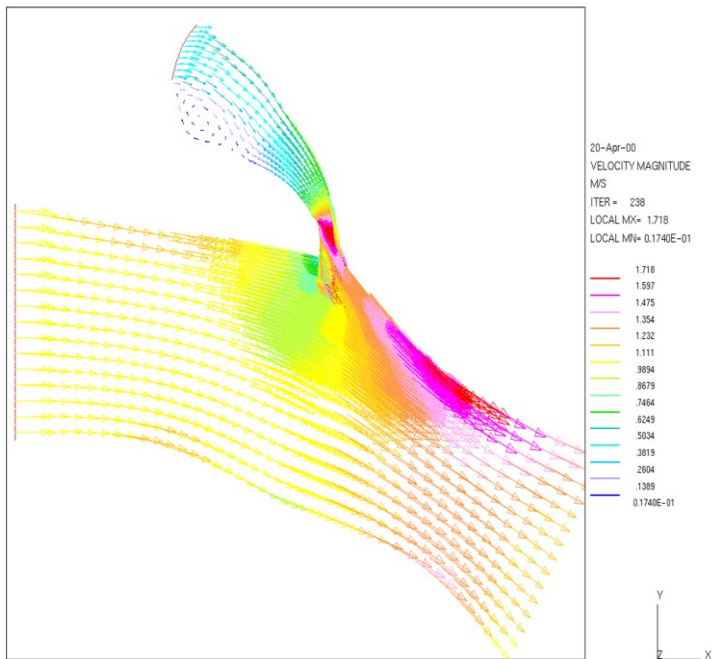


Рис. 2. Цифровая модель рельефа дна основного дна участка 910-913 км реки Волги

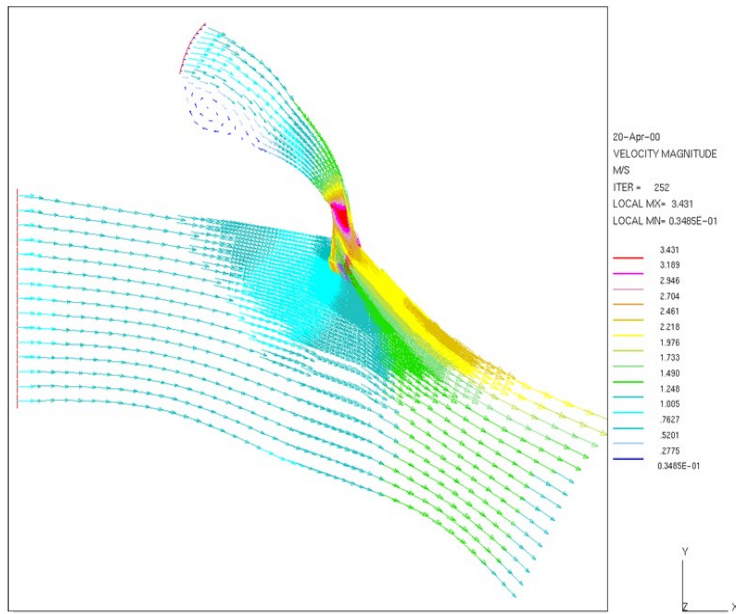
Предположим, что авария произошла в затоне. При изменении скорости потока от 0,1 до 2 м/с можно с помощью программного комплекса с учетом модели крупных вихрей и турбулентности увидеть изменение кинематической структуры потоков под влиянием изменения их скорости на входе в затон (рис. 3).



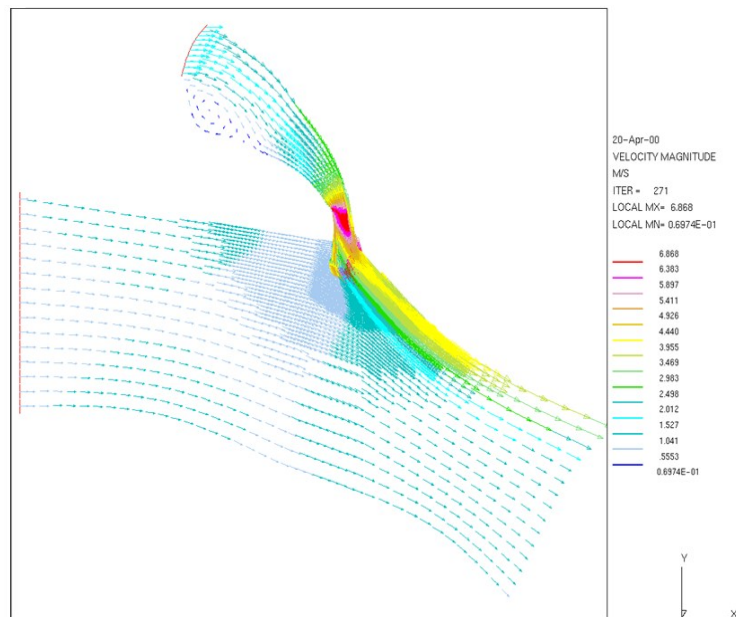
а) скорость потока 0,1 м/с



б) скорость потока 0,5 м/с



в) скорость потока 1 м/с



г) скорость потока 2 м/с

Рис. 3. Кинематическая структура потока при его различных скоростях

Из рис. 3 виден характер смещения градиентов скоростей в устьевую зону и формирование циркулярной и застойных зон при увеличении скорости потока. То

есть, с ростом скоростей промыва затона в области циркуляции потока будет расти «взмучивание» речного потока вдоль правого по течению берега. Вдоль левого берега после роста скоростей промыва до 0.5 м/с установится стабильный транзитный поток. Последний сам начнет очистку этой области русла и оздоровления экологической ситуации в затоне. Помимо этого, анализ данных рис. 3 показывает, что с ростом скоростей промыва в затоне (с целью очистки дна последнего) будут интенсифицироваться береговые деформации на левой стороне, то есть левый берег в зоне сочленения начнет резко размываться.

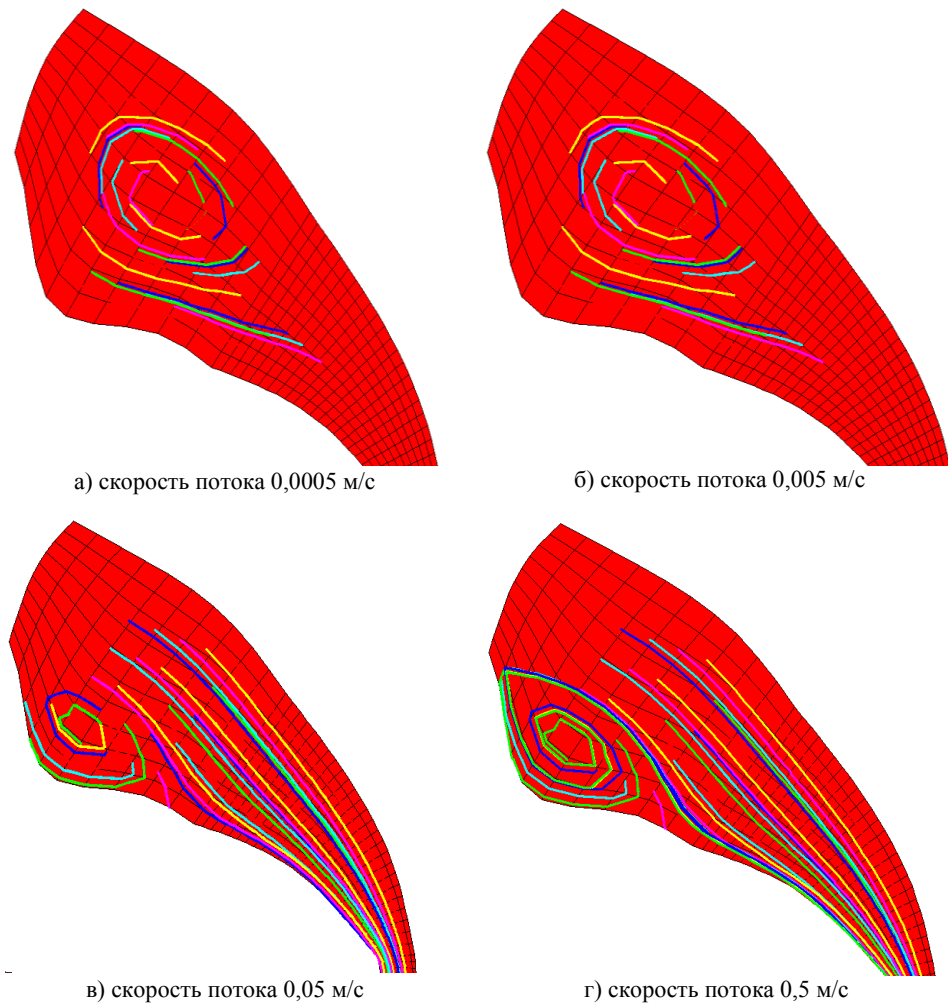


Рис. 4. Изменение траекторий движения частиц при его различных скоростях речного потока

Моделирование процесса размывания нерастворимых частиц в рассматриваемом затоне речным потоком осуществлено авторами на базе подхода Лагранжа с учетом вызванных турбулентностью случайных возмущений траекторий. В зависимости от формы нерастворимых частиц были определены с помощью программного комплекса коэффициент сопротивления, величина присоединенной массы среды и другие

факторы. Так, на рис.4 проиллюстрированы траектории перемещения нерастворимых частиц при различных значениях скорости движения речного потока.

Как видно из рис. 4, при низких скоростях (до 0,05 м/с) формируются области вертикальной турбулентности, не давая частицам диаметром 0,1 мм и плотностью 2700кг/куб. м покинуть границы затона. При увеличении скорости до 0,5 м/с частицы выносятся за пределы затона в общее русло реки в правобережной зоне. Аналогичная картина видна при изменении диаметра частиц при фиксированной скорости потока 0,05 м/с (рис. 5).

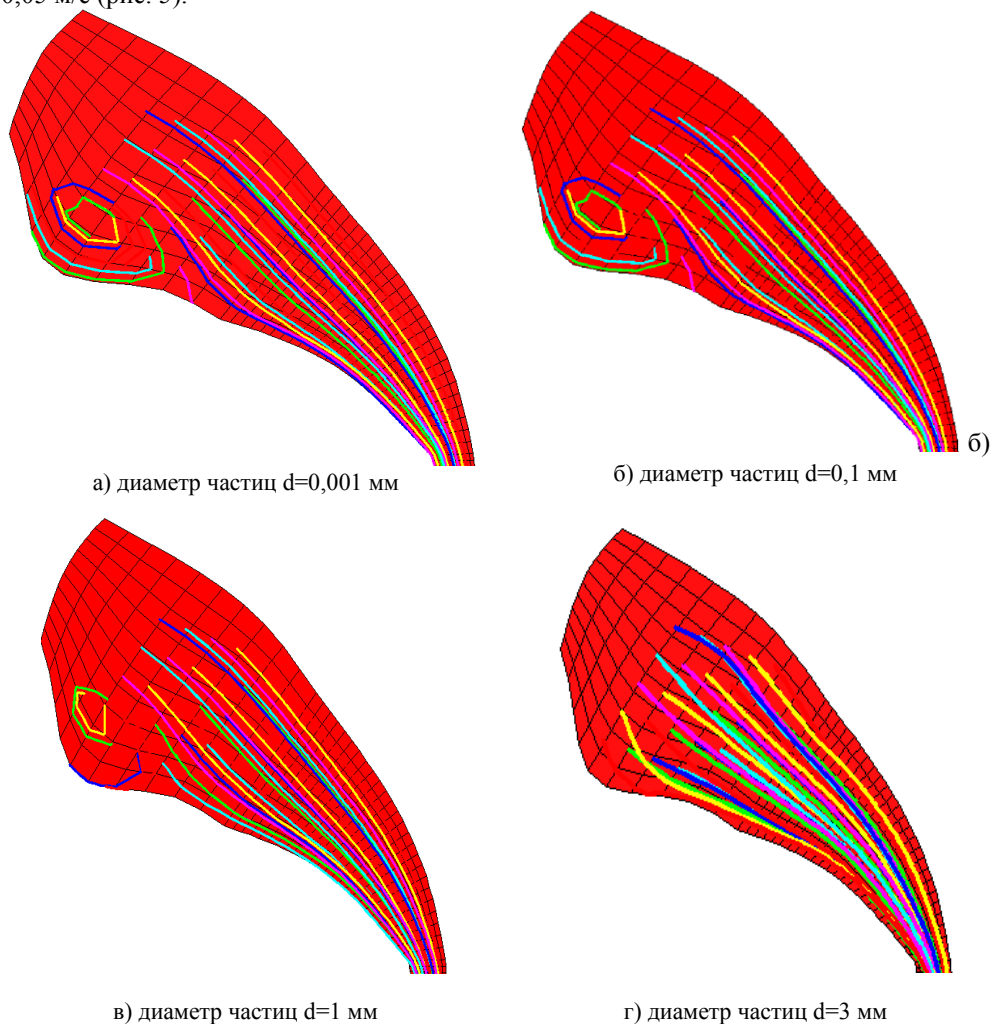


Рис. 5. Изменение траекторий движения частиц при различных диаметрах частиц

Как видно из рис. 5, частицы выносятся за пределы затона в общее русло реки в правобережной зоне, начиная с диаметра частиц от 0,1 мм. Таким образом, мелкие загрязняющие частицы диаметром до 0,1 мм в режиме самоочищения будут удалены потоком.

В речном потоке, как правило, присутствуют неконсервативные примеси, которые вступают в химические реакции как с водой, так и между собой.

Программный пакет позволяет:

- учитывать процесс взаимного перемешивания частиц вещества;
- моделировать зоны распространения вновь образующихся веществ, в соответствии с уравнениями химических реакций, заданных пользователем.

В результате выброса в реку двух солевых растворов (хлорид магния и сульфат алюминия) и попадания водозабора в область влияния продуктов реакции соли с потоком серной кислоты, на участке активизируются следующие химические реакции:

- при взаимодействии соли с водой, начинают в результате химических реакций образовываться гидроксиды и кислоты:

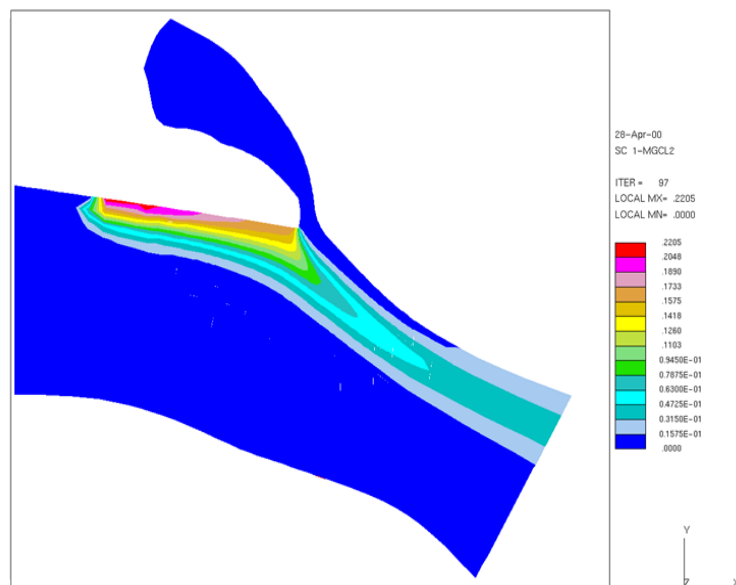


- при взаимодействии серной кислоты (образуется от взаимодействия соли с водой) с металлом (например, водозаборным сооружением) образуется сульфат железа и водород, что вызывает усиление коррозии этих сооружений:



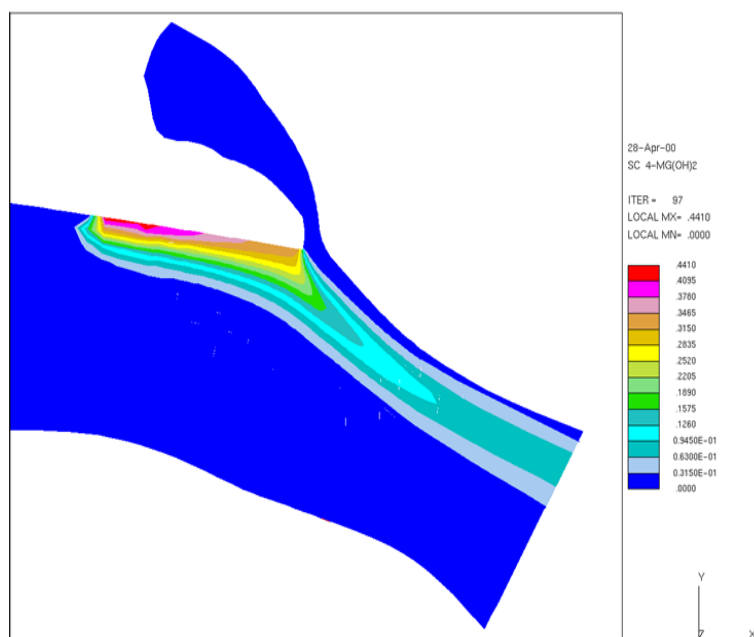
Пример распределения реагентов на участке показан на рис. 6.

В результате расчетов (рис.6) удалось выявить области концентрации отложений загрязнений, сформированные под действием гидродинамических особенностей речного потока, что позволит в дальнейшем предложить оптимальную схему очистки как затона, так и участка реки с помощью земснарядов для оздоровления их экологии.



а) Распределение концентраций хлорида магния [MgCl<sub>3</sub>]





б) Распределение концентраций гидроксида магния [  $Mg(OH)_2$  ]

Рис. 6. Распространение реагентов, полученных от взаимодействия соли с водой

### Заключение

Таким образом, авторами в данной работе были получены следующие результаты:

- показана возможность применения программного продукта FlowVision для получения более полной картины распространения загрязнения при авариях сухогрузов на внутренних водных путях;
- выявлено влияние на распространение загрязнения таких факторов, как особенность речного русла, скорость течения, диаметр загрязняющих веществ, химические реакции при попадании груза в водную среду и близость к водозаборам.

Проведенный анализ может быть полезен при уточнении методики прогнозируемого экологического ущерба и при разработке защитных мероприятий для снижения размеров экологического вреда, что и будет являться предметом дальнейших исследований авторов.

### Список литературы

1. Батанина Е.А., Бородин А.Н., Домнина О.Л., Пластинин А.Е. Определение участков концентрации транспортных происшествий с участием судов в республике Татарстан, Морские интеллектуальные технологии. № 4 part 1, С. 161-168 (2020) doi: 10.37220/MIT.2020.50.4.022
2. Домнина О.Л., Пластинин А.Е., Батанина Е.А., Наумов В.С. Оценка риска возникновения транспортных происшествий на реках в границах республики Татарстан. Морские интеллектуальные технологии. 2019. №4-2 (46). С. 79-84.

3. Батанина Е.А., Домнина О.Л. Оценка возможного размера вреда при аварийных сбросах сыпучих грузов с судов// Морские интеллектуальные технологии. 2021. Т. 1. №3 (53). С. 192-199
4. Creber, D.J., Eldridge, L., Van Der Tak, C., Duursma, M. Review of international ship-source hazardous and noxious substances risk assessments. Proceedings - 42nd AMOP Technical Seminar on Environmental Contamination and Response, p. 227-245 (2019)
5. Gasparotti, C., Rusu, E. Methods for the risk assessment in maritime transportation in the black sea Basin. Journal of Environmental Protection and Ecology, 13(3 A), c. 1751-1759 (2012)
6. Creber, D.J. Koldenhof, Y. Frequency of spill model for area risk assessment of ship-source oil spills in Canadian waters, 40th AMOP Technical Seminar on Environmental Contamination and Response, c. 286-308 (2017)
7. Ebrahimi Baha; Ahmadi Salman; Chapi Kamran; Amjadi Hazhir  
Risk assessment of water resources pollution from transporting of oil hazardous materials (Sanandaj-Marivan road, Kurdistan Province, Iran), Environmental science and pollution research international, Volume 27 Issue 28, p.35814-35827 (2020) doi:10.1007/s11356-020-09886-8
8. Sajid Zaman; Khan Faisal; Veitch Brian Dynamic ecological risk modelling of hydrocarbon release scenarios in Arctic waters, Marine pollution bulletin, Volume 153. p.111001; (2020) doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111001
9. Helle Inari; Makinen Jussi; Nevalainen Maisa; Afenyo Mawuli; Vanhatalo Jarno. Impacts of Oil Spills on Arctic Marine Ecosystems: A Quantitative and Probabilistic Risk Assessment Perspective, Environmental science & technology, Volume 54 Issue 4. p.2112-2121(2020) doi:10.1021/acs.est.9b07086
10. Liu Xin; Guo Mingxian; Wang Yebao; Yu Xiang; Guo Jie; Tang Cheng; Hu Xiaoke; Wang Chuanyuan; Li Baoquan Assessing pollution-related effects of oil spills from ships in the Chinese Bohai Sea. Marine pollution bulletin, Volume 110 Issue 1, p.194-202 (2016) doi:10.1016/j.marpolbul.2016.06.062
11. Yao Yu, Liming Chen, Wanying Zhu Evaluation model and management strategy for reducing pollution caused by ship collision in coastal waters, Ocean & Coastal Management, 16 November 2020, Volume 203 (Cover date: 1 April 2021), Article 105446, doi: 10.1016/j.ocecoaman.2020.105446
12. Aditya Rio Prabowo, Dong Myung Bae Environmental risk of maritime territory subjected to accidental phenomena: Correlation of oil spill and ship grounding in the Exxon Valdez's case, Results in Engineering, 18 September, Volume 4, Article 100035, (2019) doi: 10.1016/j.rineng.2019.100035
13. Matthias Grote, Nicole Mazurek, Carolin Gräbsch, Jana Zeilinger, Stéphane Le Floch, Dierk-Steffen Wahrendorf, Thomas Höfer, Dry bulk cargo shipping — An overlooked threat to the marine environment?, Marine Pollution Bulletin, Volume 110, Issue 1, 2016, Pages 511-519.
14. Бородин А.Н. Совершенствование тренажерной подготовки по ликвидации разливов нефти при эксплуатации судов на внутренних водных путях. Наука и устойчивое развитие общества. Наследие В.И. Вернадского. 2009. № 9. С. 259-260.
15. Пластинин А.Е. Оценка ожидаемого ущерба водным объектам при разливах нефти. Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2013. № 1 (20). С. 97-104.
16. Пластинин А.Е. Оценка загрязнения при разливе нефти на водную поверхность. Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2013. № 2. С. 129-135.
17. Решняк В.И Оценка уровня экологической опасности источников аварийных разливов нефти. Эксплуатация морского транспорта. 2020. № 4 (97). С. 72-76.
18. Приказ Минприроды России от 13.04.2009 N 87 (ред. от 26.08.2015) "Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства" Зарегистрировано в Минюсте России 25.05.2009 N 13989)

19. Домнина О.Л. Оценка риска экологических последствий от транспортных происшествий с сухогрузными судами на примере Волжского бассейна// Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1. №1 (55).С.187-193
20. Липатов И.В., Пластинин А.Е. Оценка гидродинамических условий при ликвидации разливов нефти. Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2014. № 5 (27). С. 127-134.

#### References

1. 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, С. 161-168 (2020) doi: 10.37220/MIT.2020.50.4.022
2. Olga L. Domnina, Andrey E. Plastinin, Ekaterina A. Batanina, Viktor S. Naumov Risk assessment of transport accidents on rivers in the borders of the republic of Tatarstan. Marine intellectual technologies. 2019. №4-2 (46). С. 79-84.
3. Ekaterina A. Batanina, Olga L. Domnina Assessment of the possible amount of harm in case of emergency discharges of bulk cargo from ships// Marine intellectual technologies.. 2021. №3 part 1. pp. 192-199
4. Creber, D.J., Eldridge, L., Van Der Tak, C., Duursma, M. Review of international ship-source hazardous and noxious substances risk assessments. Proceedings - 42nd AMOP Technical Seminar on Environmental Contamination and Response, p. 227-245 (2019)
5. Gasparotti, C., Rusu, E. Methods for the risk assessment in maritime transportation in the black sea Basin. Journal of Environmental Protection and Ecology, 13(3 A), с. 1751-1759 (2012)
6. Creber, D.J. Koldenhof, Y. Frequency of spill model for area risk assessment of ship-source oil spills in Canadian waters, 40th AMOP Technical Seminar on Environmental Contamination and Response, с. 286-308 (2017)
7. Ebrahimi Baha; Ahmadi Salman; Chapi Kamran; Amjadi Hazhir Risk assessment of water resources pollution from transporting of oil hazardous materials (Sanandaj-Marivan road, Kurdistan Province, Iran), Environmental science and pollution research international, Volume 27 Issue 28, p.35814-35827 (2020) doi:10.1007/s11356-020-09886-8
8. Sajid Zaman; Khan Faisal; Veitch Brian Dynamic ecological risk modelling of hydrocarbon release scenarios in Arctic waters, Marine pollution bulletin, Volume 153. p.111001; (2020) doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111001
9. Helle Inari; Makinen Jussi; Nevalainen Maisa; Afenyo Mawuli; Vanhatalo Jarno. Impacts of Oil Spills on Arctic Marine Ecosystems: A Quantitative and Probabilistic Risk Assessment Perspective, Environmental science & technology, Volume 54 Issue 4. p.2112-2121(2020) doi:10.1021/acs.est.9b07086
10. Liu Xin; Guo Mingxian; Wang Yebao; Yu Xiang; GuoJie; Tang Cheng; Hu Xiaoke; Wang Chuanyuan; Li Baoquan Assessing pollution-related effects of oil spills from ships in the Chinese Bohai Sea. Marine pollution bulletin, Volume 110 Issue 1, p.194-202 (2016) doi:10.1016/j.marpolbul.2016.06.062
11. Yao Yu, Liming Chen, Wanying Zhu Evaluation model and management strategy for reducing pollution caused by ship collision in coastal waters, Ocean & Coastal Management, 16 November 2020, Volume 203 (Cover date: 1 April 2021), Article 105446, doi: 10.1016/j.ocecoaman.2020.105446
12. Aditya Rio Prabowo, Dong Myung Bae Environmental risk of maritime territory subjected to accidental phenomena: Correlation of oil spill and ship grounding in the Exxon Valdez's case, Results in Engineering, 18 September, Volume 4, Article 100035, (2019) doi: 10.1016/j.rineng.2019.100035
13. Matthias Grote, Nicole Mazurek, Carolin Gräbsch, Jana Zeilinger, Stéphane Le Floch, Dierk-Steffen Währendorf, Thomas Höfer, Dry bulk cargo shipping — An overlooked threat to the marine environment?, Marine Pollution Bulletin, Volume 110, Issue 1, 2016, Pages 511-519.

14. Alexey N. Borodin N. 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. S. 259-260.
15. Andrey E. Plastinin, Estimation of the expected damage to water bodies in case of oil spills. Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet. Admiral S.O. Makarov. 2013. No. 1 (20). pp. 97-104.
16. Andrey E. Plastinin Estimation of pollution in case of oil spill on the water surface. Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after. Admiral S.O. Makarov. 2013. No. 2. S. 129-135.
17. Reshnyak V. And Assessment of the level of environmental hazard of sources of emergency oil spills. Operation of sea transport. 2020. No. 4 (97). pp. 72-76.
18. Prikaz Minprirody Rossii ot 13.04.2009 N 87 (red. ot 26.08.2015) "Ob utverzhdenii Metodiki ischisleniya razmera vreda, prichinennogo vodnym ob'ektam vsledstvie narusheniya vodnogo zakonodatel'stva" (Zaregistrovano v Minyuste Rossii 25.05.2009 N 13989)
19. Olga L. Domnina, Risk Assessment of Environmental Consequences from Transport Accidents with Dry Cargo Vessels on the Example of the Volga Basin. Marine intellectual technologies. 2022. № 1 (55) V.1. pp. 187-193.
20. Lipatov I.V, Plastinin A.E. Assessment of hydrodynamic conditions during oil spill response. Bulletin of the Admiral S.O. Makarov State University of Marine and River Fleet. 2014. № 5 (27). С. 127-134.

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

**Домнина Ольга Леонидовна**, кандидат технических наук, доцент, ученый секретарь, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Н.Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: o-domnina@yandex.ru

**Olga L. Domnina**, Ph.D.(Eng), assistant professor, Scientific Secretary, Volga State University of Water Transport, Nesterovast., 5, N. Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: o-domnina@yandex.ru

**Липатов Игорь Викторович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры водных путей и гидросооружений, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Н.Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: i\_lipatov@mail.ru

**Igor V. Lipatov**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Waterways and Hydraulic Structures, Volga State University of Water Transport, 603950, N. Novgorod, Nesterova str., 5, e-mail: i\_lipatov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20.04.2022; опубликована онлайн 07.06.2022.  
Received 20.04.2022; published online 07.06.2022.

УДК 629.5.011, 629.563, 621.548, 81`373  
DOI: 10.37890/jwt.vi71.258

## **Обзор средств океанотехники морского ветроэнергетического сектора**

**С.А. Казьмин<sup>1</sup>**

**А.В. Лобанов<sup>2</sup>**

**О.Я. Тимофеев<sup>1</sup>**

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

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

**Аннотация.** В связи с подписанием в 2016 году «Парижского соглашения по климату» крупнейшие вертикально-интегрированные нефтегазовые компании различных стран должны пересмотреть свою деятельность в сторону уменьшения углеродного следа. В этой связи лидеры отрасли формируют новые подходы к дальнейшему развитию и расширению бизнеса в новых условиях, их капитал вовлекается в смежные сферы деятельности, в частности, в развитие ветряной энергетики в Мировом океане. В статье рассматриваются вопросы классификации членами международной ассоциации классификационных обществ морских инженерных сооружений и флота обеспечения ветроэнергетической индустрии от морских ветряных турбин, имеющих стационарные и плавучие основания, до судов, которые выполняют операции по их строительству, установке, ремонту, техническому обслуживанию, инспекции. Кроме того, в работе освещаются вопросы использования оффшорного флота и технических средств ветроэнергетического сектора в современных реалиях, перспективы их дальнейшего развития в России и в мире.

**Ключевые слова:** ветроэнергетика, океанотехника, классификация, морская ветряная турбина, судно, обеспечение, классификационное общество, ВИЭ, декарбонизация.

## **Overview of ocean technology of the wind energy sector**

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

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

**Oleg Ya. Timofeev<sup>1</sup>**

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

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

**Abstract:** In connection with the signing of the Paris Climate Agreement in 2016, the largest vertically integrated oil and gas companies in various countries should reconsider their activities in the direction of reducing their carbon footprint. In this regard, industry leaders form new approaches to the further development and expansion of business in new conditions, their capital is involved in related areas of activity, in particular, in the development of wind energy in the oceans. This article discusses the classification of offshore engineering structures of the wind energy industry by members of the international association of classification societies, from offshore wind turbines with fixed and floating substructures, to ships that perform operations for their construction, installation, repair, maintenance, inspection, etc. In addition, the paper highlights the issues of using the offshore fleet and technical means of the wind energy sector in modern realities, the prospects for their further development in Russia and in the world.

**Keywords:** wind energy, ocean technology, classification, offshore wind turbine, vessel, support, classification society, RES, decarbonization.

## **Введение**

Энергетика – ключевой сектор экономики, играющий сегодня важнейшее значение в функционировании и существовании любого государства, так как именно этот обширный сектор экономики, являющийся совокупностью отраслей, обеспечивает энергоресурсами другие отрасли. Топливо-энергетический комплекс включает в себя нефтедобывающую, нефтеперерабатывающую, газовую, угольную и другие промышленности, а также электроэнергетику, которая неразрывно взаимосвязана с другими отраслями.

Относительно недавно, в начале 2000-х, образовался новый ключевой сегмент энергетики, появившийся на стыке судостроения, электроэнергетики и нефтегазовой отрасли. Некогда убыточные морские ветряные турбины (далее – МВТ) в новых условиях успешно прошли испытания на прототипах, поэтому сегодня мы наблюдаем появление одного из перспективнейших рынков, тех самых МВТ, поднявшийся спрос на них, а также на суда, которые обеспечивают их строительство и снабжение. И теперь, когда ситуация на международном климатическом поле стремительно меняется в связи с подписанием Парижского соглашения по климату, крупнейшим мировым компаниям и концернам нефтегазового сектора необходимо уделять пристальное внимание декарбонизации своего бизнеса. Большинство компаний видят в этом перспективу и заявляют, что к 2050 году до 50% производимой в мире энергии будет поступать из возобновляемых источников, к которым помимо классических ветряных турбин также относятся еще солнечные панели и приливные электростанции. Мэйджоры рынка, обладающие значительными ресурсами, далеко не вчера начали инвестировать в развитие этих технологий и их коммерциализацию. Exxon Mobil, Chevron, PetroChina, CNOOC, Eni, Petrobras и европейские British Petroleum, Total, Equinor и Royal Dutch Shell уже реализуют крупные проекты и вкладывают значительные средства в конкурентной борьбе на энергетическом рынке, разрабатывают новые стратегии, развивают новые сегменты бизнеса, снижая риски и уходя от углеродного следа. Многие инвесторы отмечают, что все это приведет к снижению объемов инвестиций в геологоразведочные работы, в связи с чем спрос на традиционные ресурсы может превысить предложение, и цены на топливную продукцию значительно возрастут.

Таким образом, рынок МВТ в настоящее время переживает серьезный «бум», так как все больше потребителей хотят получать «зеленую» энергию, а современная мировая экологическая повестка настроена на сокращение углеродного следа. Кроме того, обвал рынков сырья в 2020 году, в частности нефти товарных марок Brent и WTI, вплоть до отрицательных котировок на фьючерсные контракты, привел к росту спроса и повышению цен на МВТ и фрахтовых ставок на обслуживающий флот (в частности, на суда типа WTIV – Wind Turbine Installation Vessel, которые выполняют строительно-монтажные работы при установке турбин в оффшорных зонах).

Стоит отметить, что в настоящее время морские ветряные турбины в основном эксплуатируются и строятся на стационарных опорных основаниях (главным образом, это монолитное основание (Monopile) или основания ферменного типа (Jacket)); плавучие платформы не получили столь широкого развития. Вместе с тем, отраслевые исследования и оценки экспертов классификационных обществ показывают, что уже в ближайшее десятилетие активный спрос на МВТ с плавучим основанием будет неуклонно расти.

### **Разновидности морских ветряных турбин и судов обслуживающего флота**

Специалисты норвежского классификационного общества DNV (Det Norske Veritas) считают, что скоро наступит новый этап энергетического перехода, который

требует целенаправленного внедрения новых технологий. Реализация проектов создания МВТ открывает возможности для внедрения новых, более технологически сложных и мощных ветряных турбин и будет играть решающую роль в переходе к более чистому энергоснабжению, внося значительный вклад в увеличение суммарной мощности морской ветровой генерации. По данным DNV прогнозируется, что к 2050 году суммарная мощность морских ветряных турбин вырастет во всем мире до более чем 264 ГВт. [1] При этом плавучие ветроэлектростанции смогут обеспечить к 2050 г. до 2% общемирового потребления электроэнергии, а стоимость электроэнергии, вырабатываемой плавучими ВЭС, упадет за этот период примерно на 70%.

После успешного создания и демонстрации первых прототипов проектов морских ветряных турбин, в настоящее время морская ветроэнергетика делает серьезные шаги в коммерциализации. Если эти технологии преодолеют свои основные проблемы: высокие затраты и относительно низкую надежность, то средняя расчетная себестоимость производства электроэнергии на протяжении жизненного цикла морских ветроэлектростанций снизится в среднем по миру до 40 долларов США за МВт·ч к 2050 году. Столкнувшись с вызовами, множеством передовых концептуальных разработок и новых игроков на этом рынке, отрасль нуждается и предпринимает все возможные шаги для минимизации рисков и максимизации шансов на успешную реализацию новых проектов.

Существуют различные концепции реализации оффшорных ветроэнергетических систем, но все они содержат одинаковые составляющие [2]:

1. Морская ветряная турбина (Offshore Wind Turbine), состоящая из: (Рис. 1)
  - ротора-гондолы (Rotor-Nacelle Assembly - RNA), включающей генератор и трансмиссию (вариатор), которые преобразуют движение ротора в электричество, а ротор создает движение за счет ветра, действующего на лопасти;
  - опорной конструкции, поддерживающей гондолу, ступицы и лопасти, состоящей из: башенной конструкции, опорного основания и фундамента или свайного основания (обеспечивает фиксацию компонентов надводной турбины на морском дне).

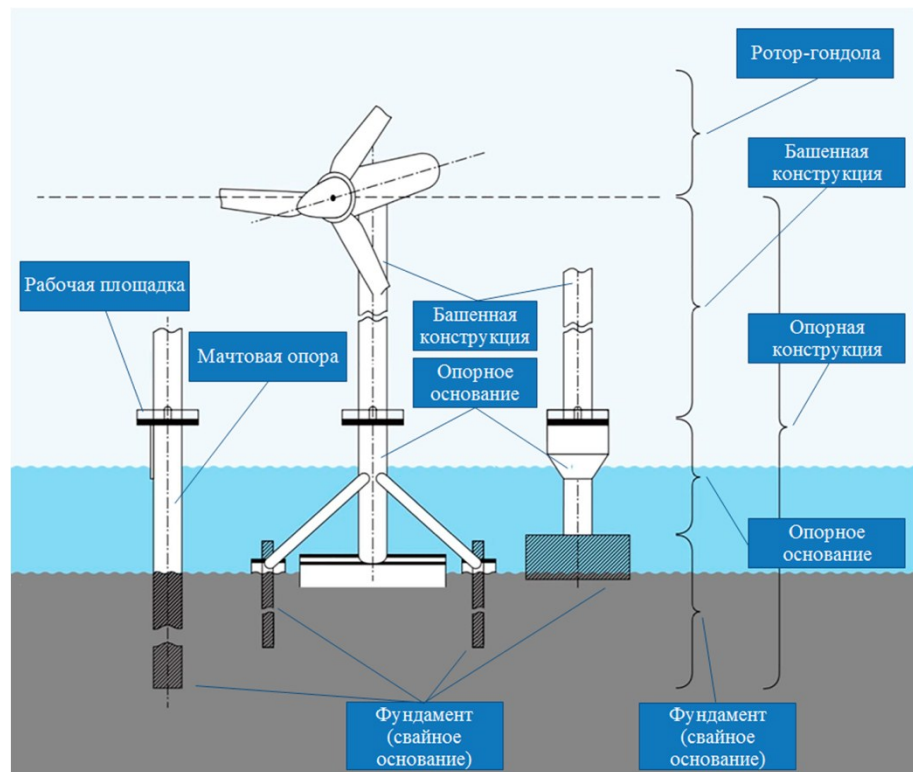


Рис. 1. Схема конструктивного устройства морской ветряной турбины [2, с. 8]

2. Морская электроподстанция (Offshore Substation) – обеспечивает трансформацию электроэнергии, вырабатываемой турбинами, для более эффективной передачи энергии. Морская электроподстанция аккумулирует и стабилизирует электроэнергию, вырабатываемую турбинами, подготавливая ее для передачи на берег, включает в себя: (Рис. 2)

- верхнее строение, включающее различное оборудование;
- опорную конструкцию – опорное основание и фундамент (свайное основание).



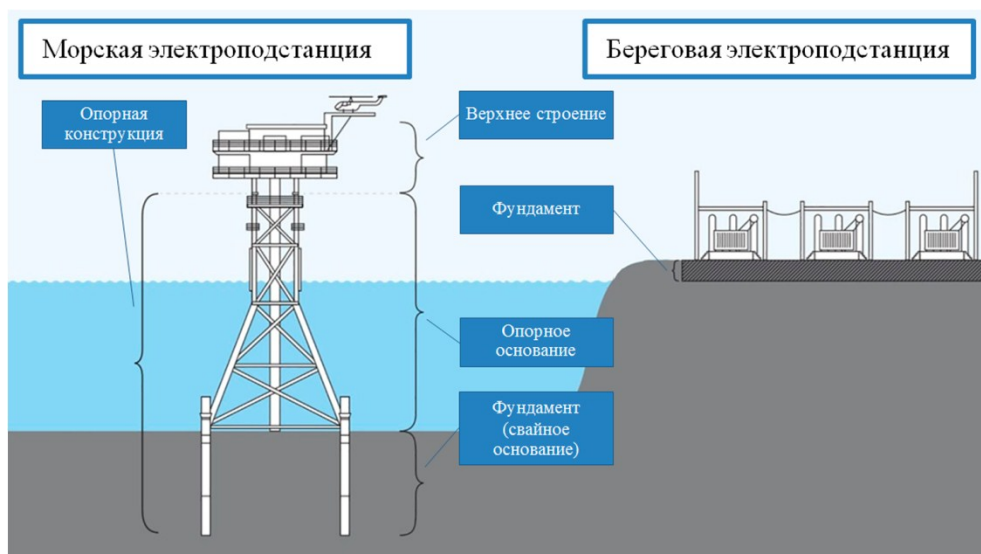


Рис. 2. Схема конструктивного устройства морской электроподстанции [2, с. 9]

3. Кабельных участков магистральных силовых кабелей, представляющих собой: (Рис. 3)

- активный кабель генератора;
- силовой кабель или совокупность кабелей, сеть массивных кабелей, соединяющих ветряные турбины в единую энергосистему и подающих энергию от турбин на морскую электроподстанцию;
- «экспортный» силовой кабель (как правило, достаточно глубоко заглубленный с целью снижения воздействия на окружающую среду и морскую экосистему, а также исключения разрушения пляжей и береговой линии). Он передает энергию с морской электроподстанции на береговую. Заглубление и проводка кабеля осуществляются, как правило, горизонтальным бурением. Береговое подключение осуществляется к существующей сети передачи электроэнергии.



Рис. 3. Схема работы ветроэнергетической цепочки передачи энергии с ветряных турбин на линии электропередачи [2, с. 7]

Жизненный цикл морской ветряной турбины можно описать следующими характерными обязательными для выполнения морскими операциями:

- инженерные изыскания на месте установки;
- установка опорной конструкции (фундамента (свайного основания), опорного основания, рабочей палубы и башенной конструкции) для турбины;
- установка собственно турбины (ротор-гондолы и лопастей);
- прокладка траншей;
- укладка «экспортного» кабеля;
- укладка кабеля между отдельными элементами морского ветроэнергетического комплекса;
- монтаж опорной конструкции (фундамента (свайного основания) и опорного основания) морской электроподстанции;
- монтаж верхнего строения электроподстанции;
- пуско-наладочные работы и ввод в эксплуатацию;
- специальное техническое обслуживание;
- подводный осмотр (инспекции) оборудования;
- периодическое техническое обслуживание;
- капитальный ремонт или модернизация;
- вывод из эксплуатации и ликвидация (утилизация).

Для выполнения всех перечисленных задач и морских операций необходим специализированный флот, который является частью обширного понятия оффшорного флота. Часть судов существующего сегодня флота обслуживания морских ветряных турбин прошла конверсию (модернизацию) из судов нефтегазопромыслового флота [3, 4]. Например, к ним можно отнести:

- судно буксир-завозчик якорей (АНТТВ - Anchor Handling Tug Supply Vessel), предназначенное для обработки якорей, буксировки их к месту и использования для закрепления МВТ на месте;

- кабелеукладочное судно (СЛВ - Cable-Laying Vessel), как правило, оснащенное оборудованием для заглабления кабеля, таким как «ножевой кабелеукладчик», используемым для одновременной прокладки и заглабления, или специализированным траншейным дистанционно управляемым подводным аппаратом, гидравлическими салазками или вертикальным инжектором;

- многофункциональное судно обеспечения строительных (строительно-монтажных, подводно-технических) работ (ОСВ - Offshore Construction vessel);

- судно обеспечения эксплуатации МВТ и других шельфовых объектов (SOV/OSV (Service Operation Vessel; Offshore Support/Supply Vessel), главным образом предназначенное для обеспечения размещения технического персонала на период работ у МВТ и его высадки на объект производства работ, имеющее, как правило, специализированный трап и кран большой грузоподъемности, а также обеспечивающее размещение более 60 человек и обладающее хорошими мореходными качествами, увеличивающими окно погоды. Примечательно также, что данной группе судов, имеющих специализированный телескопический стабилизированный трап (установленный в соответствии с отраслевыми стандартами), может быть присвоена дополнительная словесная характеристика в символе класса «Walk 2 Work»;

- судно для установки опорных конструкций и забивки свай (FIV - Foundation installation vessel), зачастую обеспечивающее также транспортировку на палубе

нескольких колонных или ферменных оснований с береговой базы к месту установки в море, оборудованное захватывающим устройством для свай, гидроударником и инструментом для шумоподавления (некоторые суда данного типа являются самоподъемными);

- судно для установки ветряных турбин (WTIV - Wind turbine installation vessel), как правило, самоходное и самоподъемное, имеющее малую высоту борта, крупногабаритный кран, большую площадь рабочей палубы для перевозки объемных и тяжелых грузов, а также достаточную вместимость помещений;

- дежурное, аварийно-спасательное судно (SV - Stand-by Vessel);

- высокоскоростное судно, предназначенное для перевозки экипажей и обслуживающего персонала (CTV - Crew Transfer Vessel);

- судно, предназначенное для технического обслуживания и ремонта подводных сооружений и установок (IMRV - Inspection, Maintenance and Repair Vessel) – высокотехнологичное судно, которое, кроме того, может быть оснащено оборудованием для выполнения других задач: обеспечения водолазных работ, очистки корпусных конструкций от коррозии (биологического обрастания) и несложных строительных работ.

Более 40% всего оффшорного флота находится под надзором трех крупнейших классификационных обществ в составе Международной ассоциации классификационных обществ: ABS, DNV и BV (Рис. 4). Исходя из этих данных, можно сделать вывод, что данные компании имеют наибольший опыт в области надзора и классификации оффшорного флота и объектов прибрежной инфраструктуры, чем другие классификационные общества. Далее рассмотрим их отдельные документы по классификации МВТ.

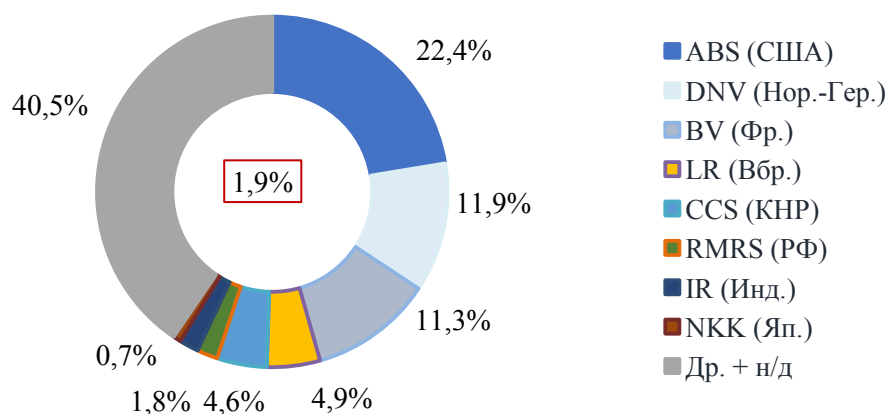


Рис. 4. Распределение оффшорных судов по классификационным обществам (по данным Clarksons Research)

Конструкция МВТ состоит из опорного основания, башенной конструкции, соединяющей опорное основание с ротор-гондольным агрегатом, находящимся над поверхностью воды, а также фундамента (свайного основания), представляющего собой монолитное сооружение или геотехническую конструкцию, расположенного на морском дне и передающего нагрузки, действующие на турбину, на дно. Опорная конструкция технологически может быть реализована разными способами, в

зависимости от особенностей того или иного проекта, условий окружающей среды в месте установки, расположения кабельно-электрической сети, особенностей грунта и глубины моря в месте установки. Крепление опорного основания к морскому дну может быть осуществлено с помощью свай, несущей плиты (опоры) или с использованием других типов фундамента - поэтому каждой МВТ помимо основной словесной характеристики может быть также присвоена дополнительная словесная характеристика в зависимости от типа ее основания или фундамента (свайного основания). В применяемой классификационными обществами классификации отражены несколько основных разновидностей таких оснований – их можно разделить на два вида по способу удержания: стационарный (опирается на дно) и плавучий (обладает плавучестью и имеет соответствующую систему удержания).

В таблице 1 представлены обобщенные данные подходов к классификации по типу конструкции основания МВТ, реализуемые основными участниками рынка в сегменте оффшорной индустрии, в таблице 2 – более подробное описание каждого типа.

*Таблица 1*

**Классификация основных типов конструкций оснований морских ветряных турбин, принятая в различных классификационных обществах и энергетическом агентстве Rystad Energy [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]**

Тип <sup>11</sup>	Типология в русскоязычной терминологии	DNV <sup>12</sup>	ABS <sup>13</sup>	BV <sup>14</sup>	Rystad Energy <sup>15</sup>
Floating Substructure (FTS) На плавучем основании	Конструкция с подводным основанием цилиндрического типа (типа SPAR)	Spar	Spar-Type	Spar	Spar buoy
	Конструкция со стабилизирующими колоннами	Column-stabilized	Column-Stabilized	Semi-submersible/ Column stabilized	Semisubmersible
	Полупогружная конструкция	Semi-submersible			
	Конструкция с натяжными связями (типа TLP)	Tension leg platform (TLP)	TLP-Type	Tension leg platform (TLP)	Tension-leg platform
	Баржа (полупогружная баржа)	Barge	Barge-Type	Barge	не используется (неприменимо) <sup>16</sup>
	Глубоководная плавучая конструкция (с увеличенной осадкой)	Deep draught floater (DDF)	не используется (неприменимо)	не используется (неприменимо)	то же

<sup>11</sup> Таблица составлена на основе данных документов, указанных в сносках<sup>1, 2, 3, 4</sup>.

<sup>12</sup> FTS: [5, с. 13, 14]; FXS: [6, с. 13, 14].

<sup>13</sup> FTS: [7, с. 11, 32]; FXS: [8, с. 17].

<sup>14</sup> FTS: [9, с. 8, 9], [10, с. 9].

<sup>15</sup> FTS: [11]; FXS: [11].

<sup>16</sup> Данные в соответствующих документах не были найдены.

	Конструкция с натяжными связями (с ограничениями вертикального перемещения)	Heave restrained TLP (HRTLP)	то же	то же	»
	Глубоководная плавучая конструкция (с ограничениями вертикального перемещения)	Heave restrained DDF (HRDDF)	»	»	»
Floating Substructure (FTS) На плавучем основании	Конструкция судового типа	Ship-shaped	»	»	»
	Конструкция башенного (ферменного) типа с гибкой связью	Articulated tower	»	»	»
	Конструкция башенного (ферменного) типа («упругая» конструкция)	Compliant tower	»	»	»
	Плавучие конструкции иного типа (мультиплатформы, гибридные конструкции)	не используется (неприменимо)	Other Types of FTS	»	Multi/hybrid
Fixed Substructure (FXS) На стационарном основании	(Стальная) конструкция ферменного типа	Jacket	Steel Jacket Type Structure	»	Jacket
	Монолитная конструкция, имеющая основание, заглубленное в грунт	Monopile	не используется (неприменимо)	»	Monopile
	Конструкция гравитационного типа	Gravity based	Gravity Structure	»	Gravity-based
	Самоподъемная конструкция	не используется (неприменимо)	Self-Elevating Unit	»	не используется (неприменимо)
	Конструкция, крепление которой осуществляется с помощью фундамента или свай, заглубленных в морское дно	то же	Pile-Supported	»	то же
	Конструкция башенного (ферменного) типа («упругая» конструкция)	»	Compliant Tower	»	»

Важно понимать, что для запуска в эксплуатацию различных типов МВТ необходимо провести определенный перечень тестовых испытаний и лабораторных исследований. Исходя из этого тезиса, следует, что плавучие типы оснований, такие как TLP, Semi-submersible, Column-stabilized, Barge и Spar – далеко не новые разработки. Опыт и знания в области таких оснований для МВТ переняты из нефтегазового сектора, где данные конструкции уже многократно проверены временем и испытаны в реальных проектах. Безусловно, существуют определенные различия между нефтегазовыми и морскими ветряными сооружениями: в частности, основания МВТ будут более уязвимы к внешним нагрузкам, экстремальным природным явлениям, чем различные МСП или ПБУ, так как имеет место огромнейшая разница в габаритах надводной части и массе. Но, в любом случае, любой опыт эксплуатации и исследований дает новую информацию, применяемую и исследуемую на практике.

Таблица 2

**Описание основных типов оснований морских ветряных турбин [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]**

№	Словесная характеристика на английском	Описание на русском
1	Spar Spar buoy	Плавучая стабилизированная по весу и плавучести конструкция с якорными линиями с подводным основанием цилиндрического типа (типа SPAR), с относительно большой осадкой по сравнению с баржами, полупогружными типами и основаниями типа TLP
2	Column-stabilized	Конструкция со стабилизирующими (как правило, конструктивно и пространственно разнесенными) колоннами, обеспечивающими плавучесть и остойчивость
3	Semi-submersibles*	Полупогружная плавучая конструкция с относительно небольшой осадкой, имеющая несколько крупногабаритных стабилизирующих колонн, обеспечивающих плавучесть и остойчивость, соединенных друг с другом горизонтальными связями (конструкциями) и имеющая якорные линии. <i>*Полупогружные плавучие конструкции обычно рассматриваются, как один из типов конструкций со стабилизирующими колоннами</i>
4	Barges	Стабилизированная плавучая конструкция с относительно большой свободной поверхностью и небольшой осадкой (баржа)
5	Tension leg platforms (TLP)	Вертикально ориентированная плавучая конструкция, система удержания которой состоит из тросов и вертикально-наклонных связей с якорями, закрепленными на морском дне
6	Deep draught floaters (DDF)	Плавучая конструкция с подводным основанием цилиндрического типа (типа SPAR) или аналогичного типа с большей (по сравнению с баржами и полупогружными конструкциями) осадкой, значительно снижающей влияние ветровых и волновых нагрузок
7	Heave restrained TLP (HRTLP)*	Плавучая конструкция с вертикально-наклонными связями, имеющая возможность свободно крениться, но имеющая ограничения с точки зрения вертикальных перемещений. <i>*Особый тип конструкции TLP (практически не реализован до настоящего времени)</i>

8	Heave restrained DDF (HRDDF)*	Плавающая конструкция с подводным основанием цилиндрического типа (типа SPAR) или аналогичного типа с большей (по сравнению с баржами и полупогружными конструкциями) осадкой, имеющая возможность свободно крениться, но имеющая ограничения с точки зрения вертикальных перемещений. <i>*Особый тип конструкции DDF</i>
9	Ship-shaped	Плавающая конструкция судового типа
10	Articulated tower*	Конструкция башенного (ферменного) типа, которая с помощью гибкой связи соединена с морским дном посредством карданного шарнира и удерживается вертикально за счет действующей на нее выталкивающей силы. Конструкция может свободно колебаться в любом направлении и не передает никакого изгибающего момента на основание. <i>*Такие конструкции закреплены на морском дне как стационарные конструкции, но используют плавучесть как неотъемлемую часть несущей системы</i>
11	Compliant tower	Конструкция башенного (ферменного) типа («упругая» конструкция) относительно небольшого диаметра с гибкой связью, имеющая массу и жесткость, позволяющую снижать воздействие ветра, волн и течения за счет относительно свободных колебаний. Период собственных колебаний таких конструкций обычно превышает 25 секунд, поэтому их собственные колебания, как правило, не совпадают с периодом волн. Стабилизация такой конструкции также может частично обеспечиваться средствами плавучести, для боковых удерживающих устройств могут использоваться наклонные связи-оттяжки
12	Multi/hybrid	В то время как большинство концепций МВТ подпадают под одну из трех доминирующих классификаций, на быстро развивающемся рынке плавучих ветряных турбин существуют вариации, которые еще не прошли четкой стандартизации: - мультитурбинные (как правило, массивные полупогружные платформы, на которых установлено более одной ветряной турбины); - гибридные (быстро развивающиеся технологические концепции, предусматривающие, например, включение в состав конструкции плавучей ветровой платформы устройства для получения энергии волн)
13	Jacket	Стальная ферменная конструкция гравитационного типа
14	Monopile	Монолитная конструкция, имеющая опорную конструкцию, заглубленную в грунт в качестве фундамента
15	Gravity Structure	Конструкция гравитационного типа, основание которой устанавливается непосредственно на морском дне
16	Self-Elevating Unit (to be Used as the Substructure)	Самоподъемная установка с подвижными опорами, способная поднимать свой корпус над поверхностью моря на опорах, которые опираются на морское дно, и предназначенная для использования в качестве основания МВТ. Корпус самоподъемной установки обладает достаточной плавучестью для транспортировки. Опоры такой установки могут быть сконструированы таким образом, чтобы заглубляться в морское дно, снабжены специальными опорными башмаками или могут опираться на дно
17	Pile-Supported Substructure	Конструкция, крепление которой осуществляется с помощью фундамента или свай, заглубленных в морское дно

Отдельные типы оснований не нашли на сегодняшний день широкого применения, а находятся лишь на стадии концептуальной или проектной разработки, либо на этапе лабораторных исследований.

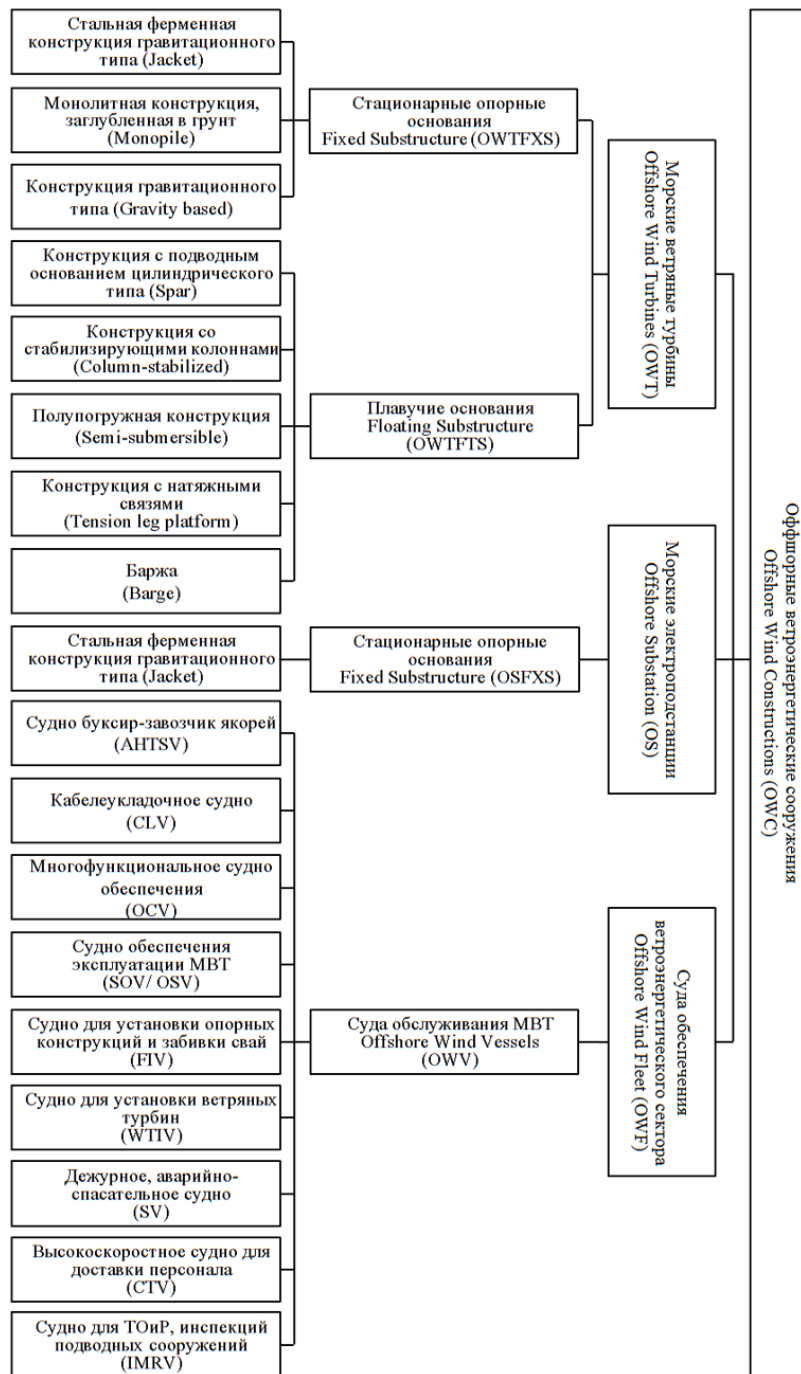


Рис. 5. Основные типы сооружений и судов морской ветроэнергетической промышленности



Например, в документах DNV упоминаются основания типов HRTLР и HRDDR – при этом в настоящее время отсутствуют примеры их использования на реальных проектах, так как они находятся на начальных этапах проектирования по шкале TRL17.

Основные типы стационарных и плавучих оснований МВТ, а также основные типы судов флота обеспечения ветроэнергетического сектора представлены на рис. 5.

### **Заключение**

Рассматриваемая в статье отрасль быстро развивается, и в этой связи можно отметить, что различные страны находятся сегодня на разных этапах развития альтернативной энергетики, каждая компания имеет свои взгляды, технологии, знания и опыт, а также подходы к реализации тех или иных проектов и выбору технико-технологических решений в данной области.

Несмотря на то, что компании отрасли достигли успехов разного уровня, все перечисленные в данной работе классификационные общества проявляют заинтересованность в развитии таких технологий с целью увеличения коммерциализации своих технических решений, обеспечения своего устойчивого технологического развития, развития мировой науки, а также улучшения условий жизни общества.

Стоит отметить, что представленные в статье подходы энергетического агентства Rystad Energy демонстрируют некую единую, систематизированную и структурированную систему классификации морских ветряных турбин.

При этом можно констатировать, что в нормативно-технических документах ФАУ «Российский морской регистр судоходства» не представлена классификация морских ветряных турбин и предназначенных для их обслуживания специализированных судов, что, по мнению авторов, связано с тем, что в России пока отсутствуют релевантные оффшорные проекты и энергетические компании, реализующие сколь-нибудь масштабные проекты морской ветроэнергетики. Однако уже в ближайшем будущем ситуация в этом сегменте может поменяться и для отечественных компаний нефтегазового сектора, так как крупнейшие российские компании ТЭК обладают значительными средствами, необходимыми для инвестиций в передовые проекты для выхода на новый рынок.

### **Список литературы**

1. Официальный сайт DNV. Floating Offshore Wind. URL: <https://www.dnv.com/focus-areas/floating-offshore-wind/index.html>
2. Официальный сайт DNV. Service specification. DNVGL-SE-0073. Project certification of wind farms according to IEC 61400-22. Edition December 2014. 66 p. URL: <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/SE/2014-12/DNVGL-SE-0073.pdf>
3. Официальный сайт ABS. Rules for Building and Classing. Marine Vessels. Part 5D. Offshore Support Vessels for Specialized Services. January 2022. 299 p. URL: [https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/other/1\\_marinevesselrules\\_2022/mvr-part-5d-jan22.pdf](https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/other/1_marinevesselrules_2022/mvr-part-5d-jan22.pdf)

---

17 Шкала TRL (Technology readiness levels) определяет уровни технологической готовности изделий (решений) для различных инновационных отраслей и предполагает уровни (стадии) от 1 (концептуальная проработка) до 9 (реализуемое проектное решение, прошедшее испытания, экспертизу, реализованное в прототипе и готовое к промышленному производству). [12]

4. Казьмин С. А., Кораблева М. С., Лобанов А. В., Тимофеев О. Я. Особенности классификации судов нефтегазопромыслового флота // Известия КГТУ
5. Официальный сайт DNV. Standard. DNL-ST-0119. Floating wind turbine structures. Edition June 2021. 167 p. URL: <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/ST/2021-06/DNV-ST-0119.pdf?elqTrackId=79B99851A6FD53600CBBFDFB11483F9C&elqaid=1744&elqat=26>.
6. Официальный сайт DNV. Standard. DNV-ST-0126. Support structures for wind turbines (Preview copy). Edition December 2021. 32 p. URL: [https://brandcentral.dnv.com/fr/gallery/10651/others/d034ae6575e84991bd5cea3d509ea385\\_hi.pdf?\\_ga=2.15508342.1780752005.1646153185-442399091.1645462355](https://brandcentral.dnv.com/fr/gallery/10651/others/d034ae6575e84991bd5cea3d509ea385_hi.pdf?_ga=2.15508342.1780752005.1646153185-442399091.1645462355)
7. Официальный сайт ABS. Guide for Building and Classing. Bottom-Founded Offshore Wind Turbines. July 2020. 161 p. URL: [https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/offshore/176\\_bowti/bowt-guide-july20.pdf](https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/offshore/176_bowti/bowt-guide-july20.pdf)
8. Официальный сайт ABS. Guide for Building and Classing. Floating Offshore Wind Turbines. July 2020. 184 p. URL: [https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/offshore/195\\_fowti/fowt-guide-july20.pdf](https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/offshore/195_fowti/fowt-guide-july20.pdf)
9. Официальный сайт BV. Offshore Wind. Moving to floating, with trust. Technology report. September, 2021 #9
10. Официальный сайт BV. Classification and Certification of Floating Offshore Wind Turbines. January 2019. Rule Note NI 572 DT R02 E. 81 p. URL: [https://erules.veristar.com/dy/data/bv/pdf/572-NI\\_2019-01.pdf](https://erules.veristar.com/dy/data/bv/pdf/572-NI_2019-01.pdf)
11. Rystad Energy. Offshore vessel report. 4Q 2021. Vessel analytics
12. Официальный сайт DNV. Service specification. DNV-GL-0422. Certification of floating wind turbines. Edition July 2018. 68 p. URL: <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/SE/2018-07/DNVGL-SE-0422.pdf>

#### References

1. Official site of the DNV. Floating Offshore Wind. URL: <https://www.dnv.com/focus-areas/floating-offshore-wind/index.html>
2. Official site of the DNV. Service specification. DNVGL-SE-0073. Project certification of wind farms according to IEC 61400-22. Edition December 2014. 66 p. URL: <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/SE/2014-12/DNVGL-SE-0073.pdf>
3. Official site of the ABS. Rules for Building and Classing. Marine Vessels. Part 5D. Offshore Support Vessels for Specialized Services. January 2022. 299 p. URL: [https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/other/1\\_marinevesselrules\\_2022/mvr-part-5d-jan22.pdf](https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/other/1_marinevesselrules_2022/mvr-part-5d-jan22.pdf)
4. 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.
5. Official site of the DNV. Standard. DNL-ST-0119. Floating wind turbine structures. Edition June 2021. 167 p. URL: <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/ST/2021-06/DNV-ST-0119.pdf?elqTrackId=79B99851A6FD53600CBBFDFB11483F9C&elqaid=1744&elqat=2>
6. Official site of the DNV. Standard. DNV-ST-0126. Support structures for wind turbines (Preview copy). Edition December 2021. 32 p. URL: [https://brandcentral.dnv.com/fr/gallery/10651/others/d034ae6575e84991bd5cea3d509ea385\\_hi.pdf?\\_ga=2.15508342.1780752005.1646153185-442399091.1645462355](https://brandcentral.dnv.com/fr/gallery/10651/others/d034ae6575e84991bd5cea3d509ea385_hi.pdf?_ga=2.15508342.1780752005.1646153185-442399091.1645462355)
7. Official site of the ABS. Guide for Building and Classing. Bottom-Founded Offshore Wind Turbines. July 2020. 161 p. URL: [https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/offshore/176\\_bowti/bowt-guide-july20.pdf](https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/offshore/176_bowti/bowt-guide-july20.pdf)
8. Official site of the ABS. Guide for Building and Classing. Floating Offshore Wind Turbines. July 2020. 184 p. URL: [https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/offshore/195\\_fowti/fowt-guide-july20.pdf](https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/offshore/195_fowti/fowt-guide-july20.pdf)
9. Official site of the BV. Offshore Wind. Moving to floating, with trust. Technology report. September, 2021 #9
10. Official site of the BV. Classification and Certification of Floating Offshore Wind Turbines. January 2019. Rule Note NI 572 DT R02 E. 81 p. URL: [https://erules.veristar.com/dy/data/bv/pdf/572-NI\\_2019-01.pdf](https://erules.veristar.com/dy/data/bv/pdf/572-NI_2019-01.pdf)
11. Rystad Energy. Offshore vessel report. 4Q 2021. Vessel analytics

12. Official site of the DNV. Service specification. DNV-GL-0422. Certification of floating wind turbines. Edition July 2018. 68 p. URL: <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/SE/2018-07/DNVGL-SE-0422.pdf>

#### **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](mailto:kazmin.energy@gmail.com)

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

**Тимофеев Олег Яковлевич**, доктор технических наук, профессор, декан факультета «Кораблестроения и океанотехники», Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, улица Лоцманская, дом 3, e-mail: [oleg\\_timof@mail.ru](mailto:oleg_timof@mail.ru)

**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](mailto:kazmin.energy@gmail.com)

**Aleksey V. Lobanov**, Head of the Marine Activity Support Department of Shipbuilding and Marine Equipment Operation, PJSC Gazprom, Lakhtinsky Avenue, 2, 3, 1, Saint-Petersburg, 197229, Russia, e-mail: [al.lobanov@adm.gazprom.ru](mailto:al.lobanov@adm.gazprom.ru)

**Oleg Ya. Timofeev**, Doctor of sciences (Technical), Professor, Dean of the Faculty of «Shipbuilding and ocean engineering» of the State Marine Technical University, Lotsmanskaya Street, 10, Saint-Petersburg, 190121, Russia, e-mail: [oleg\\_timof@mail.ru](mailto:oleg_timof@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 20.04.2022; опубликована онлайн 07.06.2022.  
Received 20.04.2022; published online 07.06.2022.

УДК 629.12.002.8  
DOI: 10.37890/jwt.v71.269

## **Совершенствование экологической маркировки судов**

**В.С. Наумов<sup>1</sup>**  
ORCID: 0000-0002-0155-7324

**И.Б. Кочнева<sup>1</sup>**  
ORCID: 0000-0002-5612-3742

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

**Аннотация.** В настоящее время классификационными обществами предусмотрены дополнительные знаки и словесные характеристики для обозначения разнообразных мероприятий по обеспечению экологической безопасности на судне. Данная система знаков говорит о необходимости демонстрировать уровень экологической безопасности судна и стремлении соответствовать целям экологической маркировки. Авторами предлагается направление совершенствования экологической маркировки судов путем проведения комплексной оценки воздействия судна на окружающую среду с помощью экологических показателей. Предлагаемая комплексная оценка должна базироваться на экологических критериях, охватывающих весь жизненный цикл судна – проектирование, постройка, эксплуатация, утилизация. Показана необходимость установить уровень экологической безопасности судна на основании этих критериев с учетом степени влияния (важности) каждого.

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, воздействие на окружающую среду, экологическая маркировка, жизненный цикл, экологические показатели

## **Improvement of environmental labels of ships**

**Victor S. Naumov<sup>1</sup>**  
ORCID: 0000-0002-0155-7324

**Irina B. Kochneva<sup>1</sup>**  
ORCID: 0000-0002-5612-3742

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

**Abstract.** Currently, classification societies provide additional signs and verbal characteristics to indicate a variety of measures to ensure environmental safety of the ship. This system of signs indicates the need to demonstrate the level of environmental safety of the ship and the desire to meet the objectives of environmental labeling. The authors propose a direction for improving the environmental labeling of ships by conducting a comprehensive assessment of the ship's impact on the environment using environmental indicators. The proposed comprehensive assessment should be based on environmental criteria covering the entire life cycle of the ship – design, construction, operation, recycling. It is shown that it is necessary to establish the level of environmental safety of the ship based on these criteria, taking into account the degree of influence (importance) of each.

**Keywords:** environmental safety, environmental impact, environmental labels, life cycle, environmental indicators.

## **Введение**

В настоящее время наблюдается все возрастающее негативное воздействие хозяйственной деятельности на окружающую среду, что приводит к повышению потребительских требований к экологическим характеристикам товаров и услуг. В связи с этим отмечается развитие различных программ экологической маркировки во всех секторах экономики.

Экологическая маркировка представляет собой комплекс информации о продукции, процессе, услуги в виде текста, условных обозначений, а также их комбинаций. Она наносится в зависимости от конкретных условий непосредственно на изделие, упаковку, табличку, этикетку или в сопроводительную документацию. Тем самым осуществляется идентификация продукции, которая отвечает критериям экологической предпочтительности. А также, это инструмент, который позволяет трансформировать усилия в области решения экологических проблем в конкурентные преимущества при рыночном продвижении продукции.

До недавнего времени экологическая маркировка использовалась главным образом в отношении потребительских товаров. Но после разработки стандартов ИСО 14020, 14024 она может применяться в большом количестве стран и рынков. В документах устанавливаются принципы и процедуры разработки программ экологической маркировки, включающие выбор категорий продукции, критериев экологической оценки продукции и характеристик функций продукции. При этом экологические критерии должны разрабатываться для того, чтобы отличать в группе однородной продукции экологически предпочтительную продукцию на основании измеряемой разницы воздействий на окружающую среду. Экологические критерии оценки продукции устанавливаются при рассмотрении всего жизненного цикла продукции, что позволяет добиться цели снижения вредного воздействия на окружающую среду [1].

Суда, являясь сложными инженерными сооружениями, строятся по правилам классификационных обществ. Судну, соответствующему правилам классификационного общества, присваивается класс и выдается классификационное свидетельство. Основанием для присвоения класса является положительные результаты рассмотрения технической документации проекта и освидетельствований.

У каждого классификационного общества разработана разветвленная система символов, отражающих подтвержденные обществом технические возможности судна и соответствие дополнительным критериям, превышающим минимальные требования.

Для отображения применяемых на судах мероприятий по защите окружающей среды и соответствия дополнительным требованиям правил классификационных обществ по предотвращению загрязнения предусмотрены знаки повышенной экологической безопасности. Данная система знаков демонстрирует уровень экологической безопасности судна и служит его экологической маркировкой.

## **Методы**

В работе использованы материалы национальных и международных классификационных обществ и международных стандартов ISO 14000, а также метод оценки жизненного цикла продукции.

## **Результаты**

В основе классификации лежит процесс применения разработанных специальных технических требований, объединенных в правила. С целью обеспечения

безопасности пассажиров, экипажа, груза, самого судна, окружающей среды в правилах представлены требования к прочности конструкций, обеспечению мореходных качеств судна, энергетическим установкам, судовым системам, электрооборудованию, экологической безопасности.

Основы экологической безопасности судна как техногенного объекта базируются на ограничении воздействий, оказываемых судном на окружающую среду в период эксплуатации. Нагрузка, возникающая на окружающую среду в период эксплуатации, связана с образованием на судне нефтесодержащих, хозяйственно-бытовых, промывных, балластных вод, мусора и бытовых отходов, отходов от технической эксплуатации судна, отработавших газов, выделяющихся при работе судовой энергетической установки. Учитывая необходимость ограничения воздействия на окружающую среду, классификационные общества регламентируют требования к судам для предотвращения загрязнения окружающей среды по существующим видам воздействия.

Так на классифицируемые Российским Речным Регистром (далее – РРР) суда и плавучие объекты распространяются требования Правил предотвращения загрязнения окружающей среды с судов. Для предотвращения загрязнения нефтесодержащими (далее – НВ), сточными водами (далее – СВ) с судов в состав судового оборудования входят сборные цистерны для НВ, СВ, установки для очистки НВ, СВ, стандартные сливные соединения для сдачи НВ, СВ во внесудовые приемные устройства.

Для предотвращения загрязнения мусором на судне должны предусматриваться емкости для сбора мусора, устройства для измельчения и прессования мусора, инсинератор. Для предотвращения загрязнения атмосферы отработанными газами судовых двигателей установлены допустимые значения выбросов вредных веществ [2].

В Правилах по предотвращению загрязнения судов, эксплуатирующихся в морских районах и на внутренних водных путях РФ Российского Морского Регистра Судоходства (далее – РС), предусмотрены оборудование и устройства судов по предотвращению загрязнения нефтью (сепараторы, сигнализаторы, системы автоматического замера, регистрации и управления сбросом). В конструкции судов регламентируется наличие танков изолированного балласта, отстойных танков, двойного корпуса, танки нефтяных остатков. Прописаны требования к конструкции, оборудованию и устройствам судов по предотвращению загрязнения вредными веществами, перевозимыми наливом. Для предотвращения загрязнения сточными водами предусмотрены сборные танки, установки для обработки сточных вод, оборудование для удаления сточных и хозяйственно-бытовых вод, мусором – устройствами для сбора и хранения, для измельчения и прессования мусора, инсинераторы. Для защиты атмосферы предусмотрен контроль за выбросами с судов [3].

Кроме того, и РРР и РС предусмотрено назначение судам знаков повышенной экологической безопасности. Так РРР предусматривается возможность назначения судну уровня экологической безопасности ЭКО1, ЭКО2 или ЭКО3 [4]. При назначении этих уровней подтверждается соответствие судна требованиям по предотвращению загрязнения с судов в аварийных случаях. К основным требованиям можно отнести наличие в районе расположения грузовых помещений двойного дна и двойных бортов. Судно должно иметь альтернативные средства для сохранения возможности маневрировать в случае отказа одного из элементов винторулевого комплекса; одобренные план операции с топливом, судовое руководство по безопасной замене балласта в море, план операции со сточными водами, журнал обнаружения эксплуатационных утечек смазочного масла и масла гидравлики на поверхности воды. Предполагается также наличие свидетельств, например,

Международного свидетельства о предотвращении загрязнения атмосферы, Международного свидетельства о предотвращении загрязнения сточными водами, Удостоверения о соответствии требованиям Резолюции ИМО А.962(23) «Руководство по утилизации судов».

РС предусмотрено назначение дополнительных символов для судов с повышенной экологической безопасностью ЕСО или ЕСО-S в символе класса. Знак ЕСО предусматривает РС для судна соответствующему требованиям правил РС по контролю и ограничению эксплуатационных выбросов и сбросов, а также требованиям по предотвращению загрязнения окружающей среды в аварийных случаях; знак ЕСО-S, если судно соответствует дополнительным требованиям правил РС по предотвращению загрязнения. Так, например, для присвоения знака ЕСО в символе класса необходимо обеспечить выполнение требований по выбросам в атмосферу (например, иметь Свидетельство о предотвращении загрязнения атмосферы, Свидетельство по энергоэффективности судна); а также требования к сбросам в море и требования по предотвращению загрязнения мусором (например, Свидетельства о предотвращении загрязнения нефтью, сточными водами, по противообрастающей системе, об управлении балластными водами, о наличии Перечня опасных материалов).

Классификационное общество DNV GL использует в символе класса обозначения CLEAN, CLEAN DESIGN, устанавливая требования к конструкции, эксплуатации и оборудованию судна, снижающие воздействие на окружающую среду от выбросов в атмосферу, сбросов в море и определяет основные требования к контролю и ограничению эксплуатационных выбросов и сбросов [5]. Так, судну удовлетворяющему требованиям по контролю и ограничению эксплуатационных выделений и выливов присваивается знак CLEAN, а судну, удовлетворяющему дополнительным проектным требованиям по защите от аварий и ограничению их последствий – знак CLEAN DESIGN.

Bureau Veritas (далее – BV) предусматривает дополнительные обозначения классов судов по предотвращению загрязнения моря и воздуха – CLEANSHIP и CLEANSHIP SUPER. Обязательным условием для присвоения дополнительного обозначения класса является соответствие судна принятым приложениям к Конвенции MARPOL 73/78, Международной конвенции о контроле за вредными противообрастающими системами [6].

Для назначения данных символов необходимо иметь ряд сертификатов, эксплуатационных документов, судовой технической документации, обозначенных Правилами Bureau Veritas. Также предусматриваются в процессе эксплуатации испытания и измерения, позволяющие установить эффективность внедренных процедур по обращению с отходами, отслеживать уровень качества сточных вод, сбрасываемых в море. В частности, осуществляется сбор фактических данных об образовании объемов отходов, анализ сточных вод и отходов на наличие загрязняющих веществ с определением их концентраций.

Знак CLEANSHIP предусматривается Bureau Veritas (далее – BV), если судно удовлетворяет требованиям BV по контролю и ограничению эксплуатационных выделений в атмосферу и выливов в море. Знак CLEANSHIP SUPER предусматривает выполнение тех же требований, что и CLEANSHIP, но при этом добавляется по крайней мере три дополнительных знака из следующих: AWT – судно оборудовано установкой обработки сточных вод; BWT – оборудовано установкой обработки балластных вод; GWT – оборудовано установкой обработки сточных вод из ванн, умывальников, стиральных машин, кухонных устройств; HVSC – судно оборудовано устройством подключения к высоковольтному питанию с берега; NDO-x days – количество суток (не менее 1), в течение которых судно способно эксплуатироваться

с полным составом экипажа и пассажиров без выброса любых субстанций в море; NO<sub>x</sub>-х% - среднее количество выбросов NO<sub>x</sub> от двигателей не превышает х% установленного ИМО лимита второго уровня; OWS-х ppm – судно оборудовано сепаратором льяльных вод, в выходных стоках которого содержание углерода не превышает х ppm; SOX-х% - судном используется топливо внутри и вне районов контроля выброса с содержанием серы, не превышающим х% установленного ИМО лимита.

Другими классификационными обществами также присваиваются знаки повышенной экологической безопасности, в основу назначения которых аналогично положены мероприятия по охране окружающей среды от загрязнения судами.

Таким образом, можно сказать, что суда на стадии эксплуатации разделяются по уровню экологической безопасности. В основу подобного разделения положено наличие тех или иных мероприятий по контролю и ограничению выбросов и сбросов в окружающую среду.

### **Обсуждение**

Классификационными обществами предусматривается возможность назначать знаки повышенной экологической безопасности судну при соблюдении требований, выдвинутых в соответствующих Правилах. Существующие на настоящий момент подходы в обозначении различного уровня экологических мероприятий на судне, заложенные в знаки повышенной экологической безопасности, присваиваемые классификационными обществами судну, призваны идентифицировать суда по экологическим критериям, что является своего рода экологической маркировкой.

К судам повышенной экологической безопасности предъявляются требования к конструкции, по предотвращению загрязнения нефтью, опасными грузами, сточными водами, мусором, атмосферы. А также предписываются мероприятия по контролю за вредными противообрастающими системами, управлению судовыми балластными водами, предотвращению загрязнения при утилизации судов. Подобные требования изложены и в соответствующих конвенциях, кодексах (MARPOL 73/78, IBC), резолюциях UNECE, ИМО.

Суда, которым присваиваются знаки повышенной экологической безопасности, подтверждают требования по предотвращению загрязнения водной среды с судна в аварийных случаях, контролю и ограничению выбросов и сбросов при эксплуатации.

Таким образом, мероприятия по защите окружающей среды, предусмотренные Правилами классификационных обществ, позволяют контролировать воздействие на окружающую среду на этапах жизненного цикла – проектирование, эксплуатация. А между тем, суда оказывают соответствующие воздействия на протяжении всего жизненного цикла (рис. 1) [7] – [10].



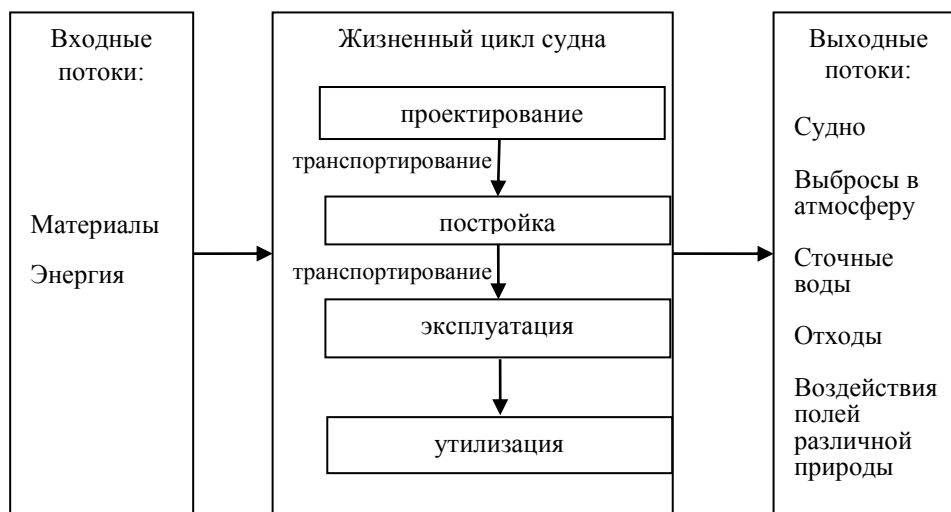


Рис. 1. Взаимодействия судна на этапах жизненного цикла

В связи с этим авторы считают, что необходимо совершенствование экологической маркировки судов путем разработки и внедрения комплексного подхода к оценке экологической безопасности судна на протяжении всего жизненного цикла.

### Обсуждение

Судно, как сложное инженерное сооружение, оказывает воздействие на окружающую среду на каждом этапе жизненного цикла. Интенсивность этого воздействия определяется применяемыми технологиями, установленными ограничениями воздействий на окружающую среду, уровнем организации и управления природоохранной деятельностью.

Оценка воздействия на окружающую среду организаций, осуществляющих деятельность на каждом этапе жизненного цикла, производится на разном уровне детальности оценки воздействий, используются различные подходы и критерии оценки, исходя из их экологической политики [11] – [13]. Между тем, цель снижения вредного воздействия на окружающую среду лучше достигается в тех случаях, когда экологические оценки устанавливаются для продукции при рассмотрении всего жизненного цикла [14], [15].

Для полноценного применения экологической маркировки для судов необходимо ее совершенствование путем оценки воздействия на окружающую среду по критериям экологической безопасности пронизывающим весь жизненный цикл (рис. 2).

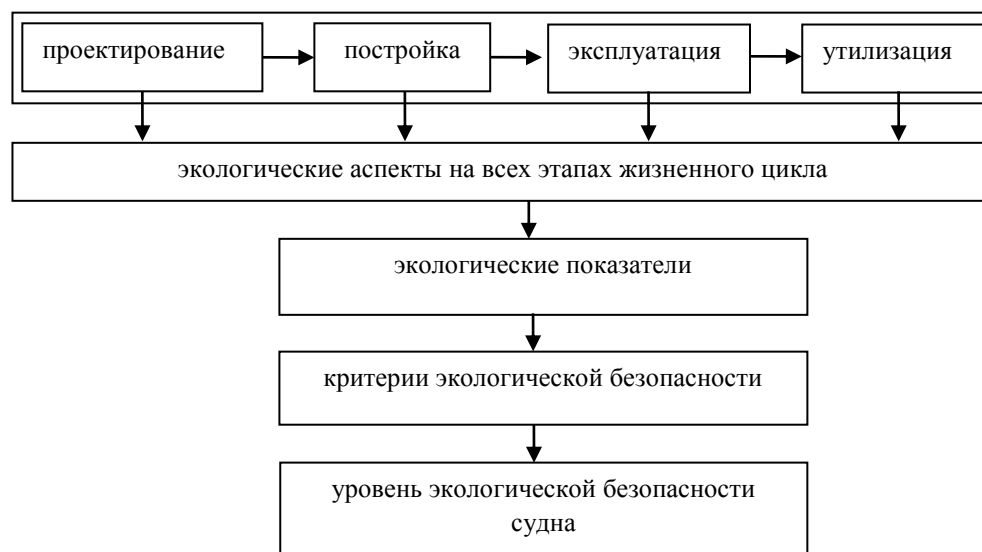


Рис. 2. Структура комплексной оценки воздействия судов на окружающую среду

В связи с этим авторами статьи предлагается представить суда как группу однородной продукции и разработать для них экологические критерии, учитывая на стадиях жизненного цикла – проектировании, постройке, эксплуатации, утилизации – экологические показатели по обоснованным важным экологическим аспектам.

Данный комплексный подход по оценке воздействий судна на окружающую среду на основании экологических критериев, проходящих по всему жизненному циклу, позволит выделить в группе судов экологически предпочтительную продукцию (например, на основании измеряемой разницы воздействий на окружающую среду), что, в свою очередь, будет способствовать конкурентоспособности судов, которые оказывают меньшую нагрузку на окружающую среду.

#### Список литературы

1. Prieto-Sandoval, Vanessa; Alfaro, José A.; Mejía-Villa, Andrés; Ormazabal, Marta. Ecolabeling as a multidimensional research topic: trends and opportunities. // *Journal of Clean Production*. 2016. Vol. 135. – Pp. 806–818. DOI:10.1016/j.jclepro.2016.06.167
2. ФАУ «Российский Речной Регистр». Правила классификации и постройки судов. URL: <https://www.rivreg.ru/assets/Uploads/izveshenia/Rossiyskiy-Rechnoy-Registr.-PRAVILA-2019.-May-2021.pdf>. (дата обращения 5.04.2022).
3. ФАУ «Российский морской регистр судоходства». Правила классификации и постройки морских судов. URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/rules?ln=ru>. (дата обращения 5.04.2022).
4. Руководство Р.029-2010. Требования к судам повышенной экологической безопасности. URL: <https://www.rivreg.ru/assets/Uploads/r-029-2010.pdf>. (дата обращения 5.04.2022).
5. DNV GL. Rules for classification: General. URL: <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/RU-SHIP/2021-07/DNV-RU-SHIP-Pt1Ch2.pdf> (дата обращения 16.03.2022 г.)
6. Bureau Veritas. Rules for the classification of steel ships. URL: <https://marine-offshore.bureauveritas.com/nr467-rules-classification-steel-ships> (дата обращения 16.03.2022 г.)

7. Corrosion degradation of ship hull steel plates accounting for local environmental conditions/ A. Zayed, Y. Garbatov, C. Guedes Soares// *Ocean Engineering*. – 2018. – Vol. 163, p. 299-306.
8. Reliability of ship hulls subjected to corrosion and maintenance/ A. Zayed, Y. Garbatov, C. Guedes Soares// *Structural Safety*. – 2013. - Vol. 43, p. 1-11.
9. Risk-informed life-cycle optimum inspection and maintenance of ship structures considering corrosion and fatigue/ YouDong, Dan M.Frangopol// *Ocean Engineering*. – 2015. - Vol. 101, p. 161-171.
10. Influence of environmental factors on corrosion of ship structures in marine atmosphere/C. GuedesSoares, Y.Garbatov, A.ZayedaG.Wang// *Corrosion Science*. – 2009. - Vol. 51, p. 2014-2026.
11. Пластинин А.Е. Оценка риска возникновения разливов нефти на внутренних водных путях // *Наука и техника транспорта*. 2015. № 1. С. 39-44.
12. Naumov V. Forecasting the Boundaries of Dangerous Oil Spills in Sea and River Ports Areas // *ICMRP Proceeding*. – Singapore, 2015. – Vol. 3. – Pp. 106-111.
13. Пластинин А.Е. Оценка размера вреда, причиненного почве, при разливах нефти с судов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. 2015. № 3 (31). С. 74-83. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-74-83.
14. Суздалева А.Л. Методика системной оценки экологической безопасности оборудования, технологий, производственных объектов // *Экология производства*. – 2015. № 11. – С. 78-85.
15. Методология оптимизации комплексной оценки экологической безопасности объектов нефтегазового комплекса. Свидетельство РАО №10508 от 15.08.2006 г. на объект интеллектуальной собственности.

#### References

1. Prieto-Sandoval, Vanessa; Alfaro, José A.; Mejía-Villa, Andrés; Ormazabal, Marta. Ecolabeling as a multidimensional research topic: trends and opportunities. // *Journal of Clean Production*. 2016. Vol. 135. – Pp. 806–818. DOI:10.1016/j.jclepro.2016.06.167
2. FAU «Rossiiskii Rechnoi Registr». Pravila klassifikatsii i postroiki sudov. URL: <https://www.rivreg.ru/assets/Uploads/izveshenia/Rossiyskiy-Rechnoy-Registr.-PRAVILA-2019.-May-2021.pdf>. (accessed 5.04.2022).
3. FAU «Rossijskij morskoy registr sudoxodstva». Pravila klassifikacii i postrojki morskix sudov. URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/rules?ln=ru>. (accessed 5.04.2022).
4. Rukovodstvo R.029-2010. Trebovaniya k sudam povy'shennoj e'kologicheskoy bezopasnosti. URL: <https://www.rivreg.ru/assets/Uploads/r-029-2010.pdf>. (accessed 5.04.2022).
5. DNV GL. Rules for classification: General. URL: <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/RU-SHIP/2021-07/DNV-RU-SHIP-Pt1Ch2.pdf> (дата обращения 16.03.2022 г.)
6. Bureau Veritas. Rules for the classification of steel ships. URL: <https://marine-offshore.bureauveritas.com/nr467-rules-classification-steel-ships> (дата обращения 16.03.2022 г.)
7. Corrosion degradation of ship hull steel plates accounting for local environmental conditions/ A. Zayed, Y. Garbatov, C. Guedes Soares// *Ocean Engineering*. – 2018. – Vol. 163, p. 299-306.
8. Reliability of ship hulls subjected to corrosion and maintenance/ A. Zayed, Y. Garbatov, C. Guedes Soares// *Structural Safety*. – 2013. - Vol. 43, p. 1-11.
9. Risk-informed life-cycle optimum inspection and maintenance of ship structures considering corrosion and fatigue/ YouDong, Dan M.Frangopol// *Ocean Engineering*. – 2015. - Vol. 101, p. 161-171.
10. Influence of environmental factors on corrosion of ship structures in marine atmosphere/C. GuedesSoares, Y.Garbatov, A.ZayedaG.Wang// *Corrosion Science*. – 2009. - Vol. 51, p. 2014-2026.

11. Plastinin A.E. Ocenka riska vznikoveniya razlivov nefiti na vnutrennix vodny`x putyax [Assessment of the risk of oil spills on inland waterways] *Nauka i tekhnika transporta*. 2015, no 1, pp. 39-44. (In Russ).
12. Naumov V. Forecasting the Boundaries of Dangerous Oil Spills in Sea and River Ports Areas // ICMRP Proceeding. – Singapore, 2015. – Vol. 3. – Pp. 106-111.
13. Plastinin A.E. Ocenka razmera vreda, prichinennogo pochve, pri razlivax nefiti s sudov [Assessment of the amount of damage caused to the soil during oil spills from ships] *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2015, no 3(31), pp. 74-83. (In Russ). DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-74-83.
14. Suzdaleva A.L. Metodika sistemnoj ocenki e`kologicheskoy bezopasnosti oborudovaniya, tehnologij, proizvodstvenny`x ob`ektov [Methodology of system assessment of environmental safety of equipment, technologies, production facilities] *E`kologiya proizvodstva*. 2015, no 11, pp. 78-85. (In Russ).
15. Metodologiya optimizacii kompleksnoj ocenki e`kologicheskoy bezopasnosti ob`ektov neftegazovogo kompleksa. Svidetel`stvo RAO №10508 ot 15.08.2006 g. na ob`ekt intellektual`noj sobstvennosti.

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

**Наумов Виктор Степанович**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой 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

**Victor S. Naumov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of the Environmental Protection and Industrial Safety, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterova street, Nizhny Novgorod, Russia, 603951

**Кочнева Ирина Борисовна**, к.т.н., доцент, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: iringre@mail.ru

**Irina B. Kochneva**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Environmental Protection and Industrial Safety, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterova street, Nizhny Novgorod, Russia, 603951

Статья поступила в редакцию 27.04.2022; опубликована онлайн 07.06.2022.  
Received 27.04.2022; published online 07.06.2022.

### **Информация для авторов**

Требования к оформлению статей, а также примеры оформления списков литературы изложены на сайте журнала <http://journal.vsuwt.ru/index.php/jwt/rules>

#### ***I. Материалы, предоставляемые автором в редакцию:***

1. Файл с текстом статьи (в формате Microsoft Word или RTF) направляется на электронный адрес [raeva@vsawt.com](mailto:raeva@vsawt.com) либо подается через сайт издания. Рекомендованный объем статьи – 0,5 - 1 печатных листов (8-16 страниц).
2. Экспертное заключение о возможности открытого опубликования материалов статьи (можно прислать PDF файл на электронную почту [raeva@vsawt.com](mailto:raeva@vsawt.com), либо направляется в бумажном виде по адресу г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, д.5, к.971).

#### ***II. Основные требования к содержанию статьи:***

1. Материал, предлагаемый для публикации, должен быть оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях. Научная статья должна содержать очевидный элемент создания нового знания в сравнении с имеющейся научной литературой по избранной теме исследования. Предпочтение отдается статьям научно-теоретического, научно-практического и аналитического характера.
2. Показатель итоговой оценки оригинальности текста в системе Антиплагиат должен быть не менее 80%, показатель заимствования не более 10%, показатель самоцитирования не более 25%

При оформлении статьи рекомендуется ориентироваться на публикации, вошедшие в Текущий выпуск.

#### ***III. Перечень структурных элементов статьи***

1. УДК (из классификатора)
2. Надпись "DOI: 10.37890/jwt.vi"
3. Название статьи
4. Сведения об авторах в формате:
  - Инициалы, Фамилия (на русском языке) каждого автора, например, И.И. Иванов
  - Идентификатор автора ORCID, например, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8255-3017>
  - Перечень учреждений всех авторов без сокращений (не указывать организационно-правовую форму), место издания, например, Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия
5. Аннотация объемом 100-250 слов текста (не менее 10 строк)
6. Ключевые слова – 8-10 слов или словосочетаний
7. Название статьи на английском языке
8. Сведения об авторах на английском языке в формате:
  - Имя, О., Фамилия каждого автора (на английском языке), например, Ivan I. Ivanov
  - Идентификатор автора ORCID
  - Перечень учреждений всех авторов на английском языке, например, Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia.
9. Аннотация (Abstract) на английском языке.
10. Ключевые слова (Keywords) на английском языке.
11. Текст статьи (должен быть структурирован; рекомендуется структура IMRaD (<https://ru.wikipedia.org/wiki/IMRAD>), например:
  - Введение
  - Методы
  - Результаты
  - Обсуждение
  - Заключение
- Благодарности
12. Список литературы
13. References (литература на английском языке)

14. Информация об авторах на русском и английском языках:
  - имя, отчество, фамилия;
  - должность, звание, ученая степень, кафедра, подразделение;
  - полное и сокращенное название организации, где выполняется работа, адрес;
  - e-mail
15. Координаты для обратной связи (e-mail, телефон)
16. Рубрика журнала, в которую подается статья для рассмотрения

#### **IV. Оформление структурных элементов статьи**

**Общее оформление** –редакция принимает тексты, сохраненные в формате .doc, .docx, .rtf.

- Размер шрифта 12, Times New Roman;
- Интервал между строками одинарный;
- Поля: левое - 3 см, правое - 1,5 см, верхнее - 2 см, нижнее - 2 см;

**УДК** – универсальная десятичная классификация, используется для систематизации научных статей. Определяется по классификатору (можно найти в Интернете). Если статья включает несколько областей знаний, то для объединения нескольких кодов используются знаки препинания (+ (плюс) - знак присоединения, / (косая черта) - знак распространения, : (двоеточие) – знак простого отношения, :: (двойное двоеточие) -знак закрепления последовательности, [] (квадратные скобки) – знак группирования).

**DOI:** 10.37890/jwt.vi — это префикс журнала.

**Название статьи** - должно кратко (не более 10 слов) и точно отражать содержание статьи (не допускаются названия, имеющие обороты такие как «К вопросу...», «Некоторые аспекты...» и аналогичные). Оформляется полужирным шрифтом, форматируется по центру. Заглавными буквами оформлять не надо!

**Аннотация** – это краткое точное изложение содержания документа, включающее основные сведения и выводы работы. Аннотация дает возможность установить основное содержание документа, используется в информационных (автоматизированных) системах для поиска документов. Аннотация выполняет функцию инструмента, позволяющего читателю понять, следует ли обращаться к полному тексту статьи. Аннотация должна быть информативной (не содержащей общих слов), содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследования), структурированной. Структура аннотации должна полностью повторять структуру статьи. В тексте аннотации следует применять значимые слова из текста статьи.

**Ключевые слова** - должны характеризовать предметную область исследования. Во всех библиографических базах данных осуществляется поиск статей по ключевым словам. (не более 3-х слов внутри ключевой фразы). Слова и/или словосочетания отделяются запятой.

**Англоязычные переводы** (название статьи, сведения об авторах, аннотация (Abstract), ключевые слова (Key words), литература (References)– должны быть качественными.

**Текст статьи** - должен быть структурирован, название частей необходимо выделять соответствующими подзаголовками, которые оформляются полужирным шрифтом и форматируются по центру. Разделы Введение (Постановка задачи) и Заключение (Выводы) являются обязательными. Приветствуется использование структуры IMRaD (<https://ru.wikipedia.org/wiki/IMRAD>):

1. *Введение* (актуальность) - описание проблемы, обзор литературы, связанной с исследованием, формулирование цели и задач исследования, обозначение нерешенных проблем, обоснование теоретической и практической значимости.
2. *Методы* -описание методов, условий и схем экспериментов, приборов, материалов и оборудования. указывается последовательность выполнения исследования и обосновывается выбор используемых методов (наблюдение, опрос, тестирование, эксперимент, лабораторный опыт, анализ, моделирование и т. д.).
3. *Результаты* - предоставление экспериментальных или теоретических данных, полученных в ходе исследований (могут быть представлены в виде таблиц, графиков, диаграмм, уравнений, фотографий, рисунков). Это основной раздел, цель которого – доказать рабочую гипотезу (гипотезы).
4. *Обсуждение* - интерпретация полученных результатов, предположения, сопоставление, сравнение полученных результатов с результатами других авторов и т.д.
5. *Заключение* - структурированные выводы, соответствующие постановке задачи исследования во введении, делаются обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их

практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытку прогноза развития рассмотренных вопросов.

6. *Благодарности* - можно упомянуть людей, помогавших авторам подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку (например, номер гранта РФФИ). Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

**Таблицы** - должны быть подготовлены стандартными средствами MS Office. Надпись Таблица 1 форматируется по правому краю (размер шрифта 11, начертание - курсив). Название таблицы форматируется по центру полужирным шрифтом. На все таблицы (табл.1) должны быть ссылки в тексте

**Рисунки** - рисунки допускаются как в растровом, так и в векторном формате. Минимальное разрешение - 300 dpi. Каждое графическое изображение должно представлять собой единый, цельный объект. Подпись к рисункам приводится на русском и английском языках. Ширина подписи примерно соответствует ширине рисунка. Текстовые подписи под рисунком не должны быть частью рисунка. Рисунки (диаграммы, графики) должны допускать возможность редактирования и изменения их размеров. По возможности используйте для графического материала минимально требуемое разрешение. На все рисунки (рис.1) должны быть ссылки в тексте. Рисунки и иллюстрации вставляются в текст, а не в таблицы!

**Формулы** - все формулы набираются в редакторах Microsoft Equation 3.0, MathType 6 или Конструкторе формул Microsoft Word. Шрифт символов, входящих в формулы - комбинация Symbol и Times New Roman. Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылка в тексте статьи. Если формула появляется в тексте как отдельная строка, она должна быть центрирована и, при необходимости, помечена сквозной нумерацией арабскими цифрами в круглых скобках. Если формула появляется внутри текста, обращайте внимание на размеры используемых шрифтов, чтобы они были «состыкованы» с размерами текста работы. Не сохраняйте формулы в виде рисунка и не вставляйте их в таблицы!

**Список литературы** – является обязательным элементом статьи. Ссылка на публикацию в научной статье является одним из главных показателей качества публикации, а статья с представительным списком литературы демонстрирует профессиональный кругозор и качественный уровень исследований ее авторов. Правильное описание используемых источников в списках литературы является залогом того, что цитируемая публикация будет учтена при оценке научной деятельности ее автора. По цитированию журнала определяется его научный уровень, авторитетность, эффективность деятельности ее редколлегии. Каждый научный факт должен сопровождаться отдельной ссылкой на источник. При формировании списка литературы необходимо придерживаться следующих правил:

- оформляется в соответствии с ГОСТ Р 7.0.100-2018.
- источники в списке литературы нумеруются и располагаются в порядке их упоминания в тексте.
- ссылки на все источники литературы в тексте статьи обязательны;
- не менее 10 ссылок;
- приветствуются ссылки на англоязычные источники;
- на свои статьи (самоцитирование) не более 20-25% от общего числа ссылок
- предпочтительнее ссылки на периодические издания (русские и английские), индексируемые в МНБД;
- если цитируемая статья имеет DOI, необходимо указывать его после описания цитируемой статьи. Для проверки наличия у статьи DOI можно, например, воспользоваться сервисом Crossref по ссылке <https://search.crossref.org/references>
- нежелательно включать в списки литературы анонимные источники и нормативные документы (постановления, законы, инструкции и т.д.), которые никогда не будут проиндексированы в базах данных цитирования, предпочтительно их цитировать непосредственно в тексте или во внутритекстовых сносках;
- нежелательно использовать в списках литературы авторефераты диссертаций и диссертации, учебные пособия и учебники;
- анонимные интернет-источники необходимо указывать в постраничных сносках, а не в списках литературы.

**References** - список литературы на английском языке.

Для русскоязычных статей необходимо указывать: ФИО авторов на латинице (транслитерация); название статьи (транслитерация); перевод названия статьи на английский язык; название журнала на английском языке (транслитерация, если нет информации об использовании журналом англоязычного названия); выходные данные с обозначением на английском языке (год, том, номер страницы «от-до»); указание на язык статьи, если она представлена на русском языке (In Russ.); DOI статьи (при наличии) или URL при отсутствии DOI, если есть доступ к статье.

В этом разделе должны использоваться только английские символы, наличие кириллических знаков не допускается. При ссылке на сайты, содержащие в названии русские символы, придется воспользоваться так называемым punicode-конвертером (например, <https://hb.by/punocode-converter.aspx>). С помощью подобных онлайн-сервисов имя сайта преобразуется в специальный код, который и указывается вместо русскоязычного названия. К примеру, ссылка «<http://вф-река-море.рф>» преобразуется в <http://xn----7kcgqcbassog3b.xn--p1ai/>.

Для перевода русского текста на латиницу используются правила **British Standard Institution**. Транслитерация производится с помощью автоматического транслитератора (Формат BSI), например, <http://transliteration.pro/bsi>. (не делать транслитерацию вручную).

**Ссылка на статью в журнале**

Author A.A., Author B.B., Author C.C. Nazvanie stat'i [Title of the Article], Nazvanie zhurnala [Title of Journal], 2021, no. 66, pp. 120—130.

**Ссылка на книгу**

Familia I.O. Nazvanie knigi [Title of the Book]. Gorod, Izdatelstvo Publ., 2015, 450 p.

**Ссылка на переводное издание**

Familia I.O. [Original Title of the Book]. Gorod, Izdatelstvo Publ., 2015, 450 p. (in Russ.)

**Ссылка на статью в сборнике статей** (I.O. Sostavitel = фамилия отв. редактора или составителя)

Familia I.O. Nazvanie stat'i [Title of the Article\*], Nazvanie sbornika statei [Title of the Digest\*], ed. I.O. Sostavitel. Gorod, Izdatelstvo Publ., 2015, pp. 10—15.

**Ссылка на статью в электронном журнале**

Familia I.O. Nazvanie stat'i [Title of the Article\*], Nazvanie zhurnala [Title of Journal], 2015, no.5. Available at: <http://observatoria.rsl.ru/ru/s3/s17/s364/ok12015/> (accessed 01.12.2015)

**Информация об авторах на русском и английском языках** – оформляется в конце работы в виде таблицы (в качестве образца можно использовать статьи, опубликованные с 2020 года (№62))

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

**Митрошин Сергей Григорьевич**, к.т.н., доцент, доцент кафедры экономики и менеджмента, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: [priemnaya@vgavt-nn.ru](mailto:priemnaya@vgavt-nn.ru)

**Sergey G. Mitroshin**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Economics and Management, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951, e-mail: [priemnaya@vgavt-nn.ru](mailto:priemnaya@vgavt-nn.ru)

**Раева Ольга Александровна**, начальник издательского отдела, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: [raeva@vsawt.com](mailto:raeva@vsawt.com)

**Olga A. Raeva**, Head of Publishing Department, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951, e-mail: [raeva@vsawt.com](mailto:raeva@vsawt.com)

**Редакция не рассматривает к публикации статьи, оформление которых не соответствует всем необходимым требованиям.**



**Научные проблемы  
водного транспорта**

**Russian Journal of Water  
Transport**

**№71(2), 2022**

Формат бумаги 70x180 1/16. Бумага офсетная.  
Ризография. Усл. печ. л. 17,75. Уч.-изд. л. 24,85.  
Заказ 030. 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.