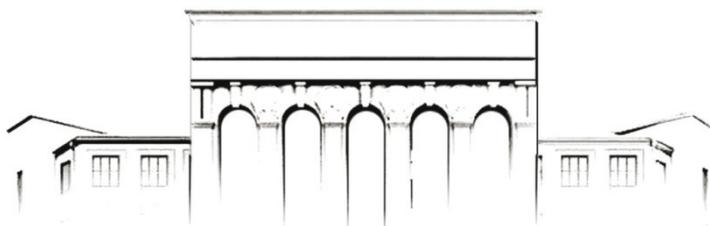


ISSN 2713-1858 (print)
ISSN 2713-1866 (online)

Russian Journal of Water Transport



Научные проблемы водного транспорта



Издается с 1930 года

Научные проблемы водного транспорта № 66 (1) 2021

№66 (1) 2021



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

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

Научные проблемы водного транспорта

№66 (1) 2021

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:**

- 05.08.01 Теория корабля и строительная механика
- 05.08.03 Проектирование и конструкция судов
- 05.08.04 Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства
- 05.08.05 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 (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;

Зуев Валерий Андреевич, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ, Институт транспортных систем Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, 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;

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

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. Раззакова, г. Бишкек, Киргизстан;

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

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

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 №66 (1) 2021

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::

- 05.08.01 Theory of the ship and structural mechanics
- 05.08.03 Ship design and construction
- 05.08.04 Technology of shipbuilding, ship repair and organization of shipbuilding production
- 05.05.05 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 (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 university of water transport, Nizhny Novgorod, Russia;

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

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

Ivan A. Volkov, Dr. Sci. (Phys-Math.), professor, Volga state university 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 university of water transport, Nizhny Novgorod, Russia;

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

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

Valeriy A. Zhev, Dr. Sci. (Tech.), professor, honored worker of Sciences of Russian Federation, Institute of Transportation System NSTU, named after E. Alekseyev;

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

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

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

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

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

Vladimir N. Kostrov, Dr. Sci. (Econ.), professor, Volga state university 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 university 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 university 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.

СОДЕРЖАНИЕ

Судостроение, судоремонт и экологическая безопасность судна

Галочкин Д.А., Акишенков М.С.

Сопоставительный анализ требований Правил Речного Регистра и европейских предписаний в отношении судовых устройств 13

Гуляев И.А., Роннов Е.П.

Анализ остойчивости комбинированных судов на стадии исследовательского проектирования..... 29

Кочнев Ю.А.

Диаграмма статической остойчивости судна находящегося в условиях волнения 36

Миронов А.А., Титко Д.Ю.

Расчетные модели прочности плавучих доков на основе метода конечных элементов..... 43

Пашеева Т.Ю., Пономаренко Д.А.

Повышение эффективности ремонта судов путем совершенствования технической подготовки судоремонтного производства 53

Ха Ван Зуи, Китаев М.В.

Методика оптимизации проектных характеристик скоростных пассажирских катамаранов..... 62

Шалак С.Е., Кеслер А.А.

Опыт эксплуатации и совершенствования речных док-кессонов 76

Эксплуатация судового энергетического оборудования

Ватолин Д.С.

Моделирование рабочего процесса, организованного по глубокому циклу Миллера в судовом двухтопливном дизеле 85

Иванов Л.В., Соловьёв А.В., Румянцев Э.Г.

Перспективы и проблемы использования сжиженного природного газа в качестве топлива на речных судах в северных пароходствах России 99

Попов С.В., Бурмакин О.А., Малышев Ю.С.

Исследование параллельной работы дизель-генераторов судовой электростанции .. 108

Экономика, логистика и менеджмент на транспорте

Кегенбеков Ж.К., Змановский А.В.

Пути совершенствования системы электронного таможенного декларирования в Казахстане 123

Трошина А.В.

Тенденции развития транспортной инфраструктуры Российской Федерации в свете повышения ее транзитного потенциала 133

Эксплуатация водного транспорта, судовождение и безопасность судоходства

Зубкова Е.В., Клементьев А.Н.

Анализ методик определения значения критической скорости судна при
заходе в камеру шлюза предельно малой ширины 145

Ситнов А.Н., Агеев С.О.

Математическая модель и алгоритмизация процесса решения задачи
внутрисуточного регулирования сброса воды через Нижегородский
низконапорный гидроузел 153

Водные пути, порты и гидротехнические сооружения

Подкорытова Д.А.

Влияние расположения разгрузочных свай в обратной засыпке на напряженно-
деформированное состояние бoulderка 165

CONTENTS

Shipbuilding, ship repair and ecological safety of the ship

Dmitriy A. Galochkin, Mikhail S. Akishenkov

Comparative analysis of the requirements of the River Register Rules and European Regulations for ship arrangements..... 13

Ilya A. Gulyaev, Evgeniy P. Ronnov

Combined ships stability analysis at the stage of design study..... 29

Yuri A. Kochnev

Diagrams of static stability of a ship in rough conditions..... 36

Anatoly A. Mironov, Dmitriy Y. Titko

Design finite element method based models of floating dry docks strength..... 43

Tatyana Y. Pashaeva, Dmitry A. Ponomarenko

Improving the efficiency of repair of vessels, through improvement of technological preparation of shipyard production..... 53

Ha Van Duy, M.V. Kitaev

Method for optimization of design characteristics of high speed passenger catamarans..... 62

Sergey E. Shalak, Anatoly A. Kesler

Main characteristics of dock-kessons, their use in the river fleet system and improvements after commissioning..... 76

Operation of ship power equipment

Dmitriy S. Vatolin

Research of the possibility of increasing the detonation stability of a marine dual-fuel diesel engine..... 85

Lev V. Ivanov, Alexey V. Soloviev, Ernest G. Rumiantsev

Prospects and problems of using liquefied natural gas as fuel on river ships in the northern steaming line of Russia..... 99

Sergey V. Popov, Oleg A. Burmakin, Yuriy S. Malyshev

Study of parallel operation of diesel generators ship power plant..... 108

Economics, logistics and transport management

Zhandos K. Kegenbekov, Artyom V. Zmanovskiy

Ways to improve the electronic customs declaration system in Kazakhstan..... 123

Anna V. Troilina

Trends in the development of the transport infrastructure of the Russian Federation in the light of increasing its transit potential.....133

Operation of water transport, navigation and safety of navigation

Alexander N. Klementev, Evgeniy V., Zubkova

Analysis of methods determining the value of the vessel's critical speed when entering the lock chamber minimum width 145

Alexander N. Sitnov, Sergey O. Ageev

Mathematical model and algorithmic process of solving the problem of the intra-day regulation of discharge of water through the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric complex..... 153

Waterways, ports and hydraulic engineering constructions

Daria A. Podkorytova

Influence of the location of unloading piles in backfill on the stress-strain state of the bolverk 165

СУДОСТРОЕНИЕ, СУДОРЕМОНТ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СУДНА

УДК 629.12

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi66.144>

Сопоставительный анализ требований Правил Речного Регистра и европейских предписаний в отношении судовых устройств

Д. А. Галочкин¹

М. С. Акишенков¹

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

Аннотация. В статье приведены результаты сопоставительного анализа требований Правил Российского Речного Регистра (PPP) и стандарта ES-TRIN в отношении судовых устройств судов внутреннего плавания. В рамках Европейского соглашения о важнейших внутренних водных путях международного значения предполагается эксплуатация судов по международному транспортному коридору, частью которого являются внутренние водные пути (ВВП) РФ. В этой связи становится актуальным вопрос о сопоставлении требований нормативно-технической документации к судам, эксплуатирующимся на ВВП РФ и европейских внутренних водных путях (ЕВВП). Цель работы — провести обзор требований Правил PPP и стандарта ES-TRIN к судовым устройствам, а также выявить различия в подходах, обусловленных условиями эксплуатации судов на реках России и Европы. В качестве метода исследования использовался сопоставительный анализ требований Правил PPP и стандарта ES-TRIN, в том числе - путем сравнения результатов расчетов элементов якорного, швартовного, буксирного, рулевого устройств, выполненных в соответствии с требованиями этих нормативных документов для конкретных проектов судов. Показано, что при расчетах суммарной длины якорных цепей для конкретных проектов судов требования Правил PPP значительно «жестче» значений, полученных согласно предписаниям стандарта ES-TRIN (для судов класса «О» — в 2 раза). Значения разрывного усилия буксирного троса буксиров, рассчитанного по Правилам PPP для судов класса «О», существенно больше (до 92 %) по сравнению со значениями, полученными согласно ES-TRIN. Отмечено, что методики по определению массы якорей, критериев маневренности, приведенные в Правилах PPP и стандарте ES-TRIN, имеют принципиальные отличия, которые не позволяют получить сопоставимые результаты. Приведенные в статье материалы могут использоваться проектными организациями при проектировании судов, эксплуатация которых предполагается на ЕВВП, а также специалистами Речного Регистра при совершенствовании своей нормативно-технической базы.

Ключевые слова: Правила PPP, суда внутреннего плавания, стандарт ES-TRIN, судовые устройства, ВВП РФ, ЕВВП, условия эксплуатации, уровень стандарта безопасности.

Comparative analysis of the requirements of the River Register Rules and European Regulations for ship arrangements

Dmitriy A. Galochkin¹,
Mikhail S. Akishenkov¹,

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

Abstract. The article presents the results of comparative analysis requirements of the River Register Rules (RRR) and ES-TRIN standard for ship arrangements of inland navigation vessels. In the framework of the European agreement on main inland waterways of international importance are expected operations of vessels on international transport corridor, part of which are the inland waterways of Russia. In this regard, the question of the comparison of requirements of normative-technical documentation for vessels operating on inland waterways of Russia and European inland waterways becomes relevant. The purpose of the work is to analyze the requirements of the River Register Rules and the ES-TRIN standard for ship arrangements, as well as to detect differences in approaches required by the operating conditions of ships on the rivers of Russia and Europe. As a research method, we used a comparative analysis of the requirements of the River Register Rules and the ES-TRIN standard, including by comparing the results of calculations of elements of anchor, mooring, towing, steering arrangements, made in accordance with the requirements of these regulatory documents for specific ship projects. It is shown that when calculating the total length of anchor chains for specific ship projects, the requirements of the River Register Rules are significantly "tougher" than the values calculated according to the requirements of the ES-TRIN standard (for "O" class vessels — by 2 times). The values of the breaking force of the towrope of tugs calculated according to the River Register Rules or class "O" vessels are significantly higher (up to 92 %) compared to the values calculated according to ES-TRIN. It is noted that the methods for determining the mass of anchors and maneuverability criteria given in the River Register Rules and the ES-TRIN standard have fundamental differences that do not allow obtaining comparable results. The materials presented in the article can be used by design organizations when designing vessels that are supposed to be operated on the European inland waterways as well as by specialists of the River Register when improving their regulatory and technical base.

Keywords: River Register Rules, inland navigation vessels, ES-TRIN standard, ship arrangements, inland waterways of Russia, European inland waterways, operating conditions, the level of safety standard.

Введение

В июле 2011 г. в Кодекс внутреннего водного транспорта Российской Федерации (далее — КВВТ) были внесены изменения, согласно которым допускается эксплуатация судов по внутренним водным путям Российской Федерации (далее — ВВП РФ) под иностранными флагами [1, 2].

Предпосылками этих изменений, как представляется, послужило подписанное Россией 26 сентября 1997 г. Европейское соглашение о важнейших внутренних водных путях международного значения. В рамках этого соглашения предполагается эксплуатация судов по международным транспортным коридорам, частью которых являются ВВП РФ (например, водные пути международного значения категории Е 50) [3].

Практическая реализация этого соглашения в границах транспортных коридоров Европейских внутренних водных путей (далее — ЕВВП) и ВВП РФ, помимо экономических, юридических, правовых аспектов, а также работ по приведению и поддержанию требуемых технических характеристик водных путей в существенной степени зависит от готовности нормативно-технической базы классификационных обществ в части обеспечения стандарта безопасности эксплуатации судов как на ЕВВП, так и на реках Российской Федерации.

В России полномочиями по классификации судов, эксплуатирующихся на ВВП РФ, наделено ФАУ «Российский Речной Регистр» (далее — Речной Регистр, РРР) [4].

При выполнении требований Правил РРР и положительных результатах классификации и освидетельствования судов Речным Регистром выдаются судовые документы о годности к плаванию, предусмотренные статьей 35 КВВТ [1].

В нормативной базе Европейского Союза в последние годы произошли существенные изменения в отношении документов, устанавливающих технические требования к судам внутреннего плавания, эксплуатирующихся на ЕВВП.

На пленарном заседании Центральной комиссии судоходства по Рейну (Central Commission for Navigation of the Rhine — CCNR) в 2015 г. была принята резолюция о создании Европейского комитета по разработке стандартов в области внутреннего судоходства (CESNI) [5, 6]. А в 2016 г. принята Директива Европейского Парламента и Совета Европейского Союза 2016/1629/ЕС «О технических требованиях к судам внутреннего водного плавания, об изменении Директивы 2009/100/ЕС и отмене Директивы 2006/87/ЕС», согласно которой документом, устанавливающим обязательные минимальные технические требования к судам внутреннего плавания на территории Европейского Союза, является стандарт ES-TRIN (далее — ES-TRIN, Европейские предписания) [7, 8].

В рамках настоящей статьи представлены результаты сравнения требований к судовым устройствам стандарта ES-TRIN и Правил Речного Регистра в отношении судов внутреннего плавания.

Анализ условий эксплуатации судов на ВВП РФ и ЕВВП

В основе требований Правил любого классификационного общества лежит накопленный им опыт классификации, который отражает особенности и условия эксплуатации [9].

Состав ВВП РФ в известной степени разнообразен — это судоходные каналы с судопропускными сооружениями с относительно малыми габаритами судового хода и крупные озера, водохранилища с условиями плаваниями, близкими к прибрежному морскому. Как правило, транспортные суда совершают длительные рейсы, чередуя как мелководные участки рек, так и глубоководные участки водохранилищ и озер, характеризующиеся неравностью сервисных служб, большими расстояниями между пунктами приема нефтесодержащих и сточных вод, мусора и т. п. [10 - 14].

Условия эксплуатации на реках Европы, в свою очередь, характеризуются высокой плотностью расположения населенных пунктов; к примеру, Дунай протекает через территорию десяти государств, проходя через столицы Центральной и Юго-Восточной Европы (Вена, Братислава, Будапешт, Белград), что наложило определенный отпечаток на конструктивно-архитектурный тип судов, в том числе, ввиду низких подмостовых габаритов судового хода (например 4,74 м на участке Верхнего Дуная (г. Пассау), максимальный 9,5 м (Нижний Дунай)) [14, 15].

Также необходимо отметить, что для рек Европы характерна меньшая глубина судового хода по сравнению с ВВП РФ. В целом реки Европы можно отнести к рекам канального типа, где наименьшая допустимая осадка судов 2,1 м (Рейн ниже города Кельн), а максимальная — всего 3,0 м (Рейн, выше города Кельн).

Навигация на реках ЕВВП чаще всего длится круглогодично (на ВВП РФ навигация в среднем составляет 230 дней), значения показателя скорости течения ЕВВП и ВВП РФ примерно одинаковы, так как реки протекают на равнинных участках, но туман преобладает на реках Европы, где порой может продолжаться до двух месяцев за навигацию [14, 15].

В таблице 1 приведены результаты сравнения характеристик некоторых участков ВВП РФ (бассейны разряда «Р», «О») и ЕВВП (зона 1, зона 2), отнесенных к международным (категория Е), полученные на первом этапе сравнения требований Правил РРР и Европейских предписаний [10 - 15].

Таблица 1

Характеристика	Нижняя Волга	Волго-Балтийский канал	Ладожское озеро	Верхний Дунай	Средний Дунай	Рейн (ниже г. Кельн)
Габариты судового хода, м	$L = 140,0$ $B = 15,0$ $T = 3,8$ $H = 16,0$	$L = 170,0$ $B = 16,8$ $T = 3,6$ $H = 14,6$	без ограничений	$L = 110,00$ $B = 11,40$ $T = 2,70$ $H = 4,74$	$L = 140,0$ $B = 15,00$ $T = 2,50$ $H = 8,15$	$L = 140,0$ $B = 15,0$ $T = 2,1$ $H = 7,0$
Температура, °С средняя в январе средняя в июле	минус 6,9 +24,8	–	минус 8 – 10 от +16 до +17	минус 3 – 6 от +17 до +20	минус 2 – 5 от +20 до +23	–
Туман, дней	7 – 14 (в октябре – ноябре)	наиболее часто на Белом озере — до 10 дней в месяц	5 – 7 дней в месяц	–	25 – 30	часто
Ветер, м/с	средняя скорость 4,7	5 – 15	5,5 – 7,9	средняя скорость = 3,4; максимальная = 36,0	средняя скорость = 2,5; максимальная = 29,0	6,2
Течение, км/ч	6,0 — в половодье; 2,6 — в межень	свальные течения до 7,2	0,5 – 1,0	8,37 — в половодье; 4,77 — в межень	5,41 — в половодье; 3,80 — в межень	6,8 — в половодье; 3,7 — в межень
Лёд за навигацию, дней	в среднем 141	в среднем 150 – 170	–	20	20	нет
Грунт	песок, торф	глинистый	песок, ил, у берегов каменистый	ил	ил	–
Примечания. 1. L, B, T, H — длина, ширина, осадка и высота прохода под мостами; 2. — данные не найдены.						

Сопоставление требований Правил РРР и стандарта ES-TRIN в отношении судовых устройств

Предварительный анализ требований показал, что в стандарте ES-TRIN приведены преимущественно требования общего характера, объем и содержание которых в общем случае уступают глубине проработки аналогичных вопросов в Правилах РРР. Например, в Правилах РРР к якорному устройству приведены исчерпывающие требования, в том числе требования к устройствам для крепления якорей и якорных цепей, якорным механизмам, цепным звездочкам, устройствам дистанционной отдачи якоря, нормам якорного снабжения, материалам, применяемым для изготовления элементов якорного устройства, и т. п. [16]. Наряду с этим, стандарт ES-TRIN как таковых требований к якорному устройству не содержит, приведены лишь требования по снабжению судов якорями и якорными цепями. Аналогичная ситуация и с требованиями к другим судовым устройствам [17].

В целом можно сделать вывод, что приведенные в стандарте ES-TRIN требования являются в некотором роде инструментом проверки безопасности воплощенных при проектировании решений; спроектировать отдельные элементы судна (в том числе судовые устройства) на основе Европейских предписаний невозможно [9].

Якорное снабжение

Снабжение якорями.

Как отмечалось выше, требований как таковых к якорному устройству в стандарте ES-TRIN не приведено, указаны лишь предписания по снабжению судов якорями и якорными цепями.

В соответствии с требованиями стандарта ES-TRIN суммарная масса носовых якорей определяется по формуле:

$$P = k \cdot B \cdot T,$$

где T , м – осадка судна;

k — коэффициент, принимаемый с учетом отношения длины L и ширины B судна, а также его типа:

$$k = c \cdot \sqrt{\frac{L}{8 \cdot B}},$$

где c — эмпирический коэффициент, принимаемый в зависимости от грузоподъемности судна (для судов, перевозящих грузы, и буксиров) и водоизмещения (для пассажирских судов и судов, не предназначенных для перевозки грузов) [17].

Иными словами, при выборе якорного снабжения учитывается грузоподъемность или водоизмещение судна. При этом район эксплуатации (ветро-волновой режим, класс) судна не учитывается.

Помимо носовых якорей суда, перевозящие грузы, а также буксиры должны иметь кормовой якорь, общая масса которого составляет 50 % от суммарной массы носовых якорей для судов длиной более 86 м и 25 % — для судов длиной менее 86 м. Однако допускается не предусматривать кормовой якорь, если его масса составляет менее 150 кг [17].

Согласно Правилам Речного Регистра подбор якорного снабжения осуществляется в зависимости от характеристики снабжения судна и района его эксплуатации (класса), а также типа судна (самоходное/несамоходное, буксиры):

$$\sum m_{\text{я}} = k_1 k_2 N_c$$

где N_c , м² — характеристика снабжения, которая определяется в зависимости от конструктивных размерений судна и величин, учитывающих парусность судна (в косвенном виде).

k_1 , k_2 — коэффициенты, определяемые в зависимости от типа судна (самоходное/несамоходное, буксир), его класса (района эксплуатации), а также скорости течения.

В отношении требований Правил РРР к снабжению судов кормовым якорем следует отметить следующее. В соответствии с требованиями Правил РРР снабжение судов кормовым якорным устройством не требуется, за исключением буксиров-толкачей и самоходных судов с характеристикой снабжения более 1000 м², если:

- эксплуатация судна предусматривается (в том числе) на участках с низкой скоростью течения (или без течения), а также для судов класса М-СП (масса кормового якоря для таких судов должна приниматься не менее 0,25 суммарной массы носовых якорей);

- эксплуатация судна предусматривается на участках судового хода, ширина которых не позволяет судну сделать оборот для постановки на носовые якоря против течения (масса кормового якоря в этом случае принимается не менее 0,4 суммарной массы носовых якорей) [16].

Как отмечалось выше, согласно Европейским предписаниям допускается не предусматривать кормовой якорь, если его масса составляет менее 150 кг. Если спроецировать это требование на Правила РРР, то кормовым якорем допускалось бы не снабжать самоходные суда класса «О» с характеристикой снабжения до 600 м2, суда класса «Р» с характеристикой снабжения до 700 м2, суда класса «Л» с характеристикой снабжения до 800 м2.

На рисунке 1 приведены некоторые результаты сопоставления суммарной массы носовых якорей, рассчитанной по Правилам РРР и Европейским предписаниям для конкретных проектов судов с классом РРР [18].

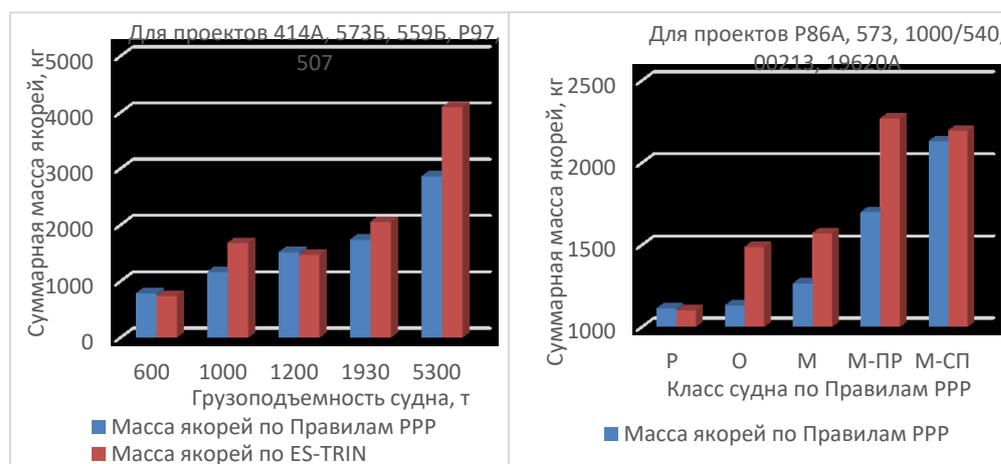


Рис. 1. Результаты сопоставления суммарной массы носовых якорей, рассчитанной по Правилам РРР и стандарту ES-TRIN

Снабжение якорными цепями.

В соответствии с требованиями стандарта ES-TRIN длина якорных цепей выбирается в зависимости от длины судна и составляет от 40 – 60 м [17].

Подход РРР в части определения длины якорных цепей аналогичен подходу по определению суммарной массы носовых якорей.

В соответствии с требованиями Правил РРР длина якорных цепей определяется:

$$l_{\Sigma} = a/[b + c \ln(N_c)/N_c],$$

где a, b, c — коэффициенты, выбираемые в зависимости от типа (самоходное, несамоходное, буксир), класса (района эксплуатации) судна [16].

В качестве иллюстрации в табл. 1 приведены результаты расчета ориентировочной суммарной длины якорных цепей судов с классом «О» РРР [18].

Таблица 2

Результаты расчета суммарной длины якорных цепей по Правилам РРР

Проект	N_c	a	b	c	$l_{\Sigma}, м$
--------	-------	-----	-----	-----	-----------------

414А	778	1	0,364 · 10 ²	0,229	178,7
573Б	1158				198,8
559Б	1508				212,8
P97	1727				217,4
507	2338				227,3

Длина кормовой якорной цепи согласно Правил РРР принимается не менее 75 % от длины наименьшей из носовых якорных цепей [16].

Результаты анализа в части требований Правил РРР и Европейских предписаний к якорному снабжению сводятся к следующему:

- методики по определению массы якорей, приведенные в Правилах РРР и стандарте ES-TRIN, имеют принципиальные отличия, которые не позволяют получить сопоставимых результатов. Однако в большинстве случаев при расчетах суммарной массы якорей для конкретных проектов судов требования Европейских предписаний более «жесткие»;

- суммарная масса якорей по Правилам Речного Регистра выбирается в зависимости от характеристики снабжения судна и района его эксплуатации (класса), типа судна (самоходное/несамоходное, буксиры), тогда как согласно Европейским предписаниям учитывается лишь грузоподъемность или водоизмещение судна (на наш взгляд, подход, приведенный в Европейских предписаниях, более «грубый»);

- требования, предъявляемые Речным Регистром к длине якорных цепей значительно «жестче» аналогичных требований согласно стандарту ES-TRIN.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что особенности условий эксплуатации на реках Европы и ВВП РФ нашли отражения в требованиях Правил РРР и ES-TRIN в отношении якорного снабжения. В Правилах РРР в части якорного снабжения акцент сделан не на более массивный якорь, а на более длинные якорные цепи; как представляется, в водохранилищах большая удерживающая сила, поставленного на якорь судна, обеспечивается за счет длины вытравленных цепей. В свою очередь, в условиях работы судов на участках с ограниченными габаритами якорных стоянок (в том числе мелководье и «слабый» (илистый, песчаный) грунт) удерживающая судно сила достигается за счет более массивного якоря.

Также при выборе якорного снабжения согласно стандарту ES-TRIN величина парусности судна не учитывается, что связано с особенностями архитектурно-конструктивного типа судов (ввиду низких значений габаритов пролетов мостов), эксплуатирующихся на ВВП.

Швартовное устройство

Объем и содержание требований Европейских предписаний в отношении швартовного устройства аналогичны таковым к якорному устройству, а именно буквально сказано следующее:

«швартовные тросы;

Суда должны снабжаться как минимум тремя тросами. Их минимальная длина должна быть следующей:

первый трос: $L + 20$ м, но не более 100 м,

второй трос: $2/3$ длины первого троса,

третий трос: $2/3$ длины первого троса.

На судах длиной менее 20 м наличие третьего троса не требуется. Разрывное усилие тросов определяется по формуле, кН;

для $L \cdot B \cdot T$ до 1000 м²

$$R_s = 60 + \frac{L \cdot B \cdot T}{10};$$

для $L \cdot B \cdot T$ более 1000 м^2

$$R_s = 60 + \frac{L \cdot B \cdot T}{10} \gg [17].$$

Требования к швартовным механизмам, кнехтам, клиповым планкам и другим элементам швартовного оборудования, а также фундаментам для их крепления (приведенные в Правилах Речного Регистра) в стандарте ES-TRIN отсутствуют.

В отношении требований к количеству и длине швартовных тросов требования Правил РРР и стандарта ES-TRIN идентичны. В этой связи сопоставление требований к швартовному устройству Правил РРР и стандарта ES-TRIN проводилось только в отношении значений разрывного усилия швартовных тросов.

В соответствии с требованиями Правил Речного Регистра разрывное усилие F_p швартовного троса следует принимать не менее [16]:

для судов с характеристикой снабжения $100 - 1000 \text{ м}^2$

$$F_p = 0,147N_c + 24,5;$$

для судов с характеристикой снабжения более 1000 м^2

$$F_p = 171 + 3,92 \cdot 10^{-2} \cdot (N_c - 1000).$$

Как видно из формул, приведенных в Правилах РРР и Европейских предписаниях, условия эксплуатации (ветро-волновой режим, класс) при определении разрывных усилий швартовных тросов не учитываются.

На рисунке 2 приведены результаты сопоставления разрывных усилий швартовных тросов для проектов судов, указанных в таблице 2.

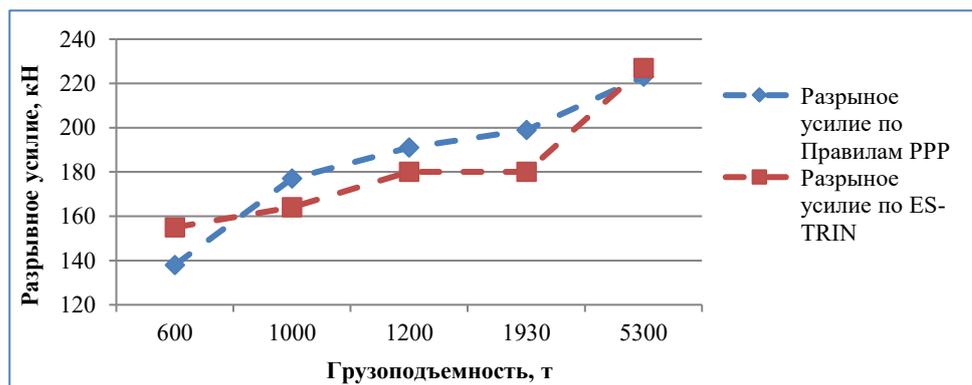


Рис. 2. Результаты сопоставления разрывного усилия швартовного троса, рассчитанного по Правилам РРР и стандарту ES-TRIN

В целом результаты анализа показали, что значения разрывного усилия швартовных тросов, рассчитанные в соответствии с требованиями Правил Речного Регистра и Европейских предписаний, практически одинаковы, что говорит о равных условиях швартовки судов, в том числе примерно одинаковом количестве шлюзовых камер.

Буксирное устройство

В отношении буксирного устройства в стандарте ES-TRIN приведены требования лишь к судам, осуществляющим буксировку.

В части длины и разрывного усилия буксирного троса в статье 13.02 Европейских предписаний приведены следующие требования:

- главный трос буксира должен быть длиной не менее 100 м с разрывным усилием, составляющим не менее одной трети от полной мощности главных двигателей (далее- ГД).

- самоходные суда и толкачи, которые также могут буксировать, оснащаются буксирным тросом длиной не менее 100 м, разрывное усилие которого составляет не менее четверти от полной мощности ГД.

Кроме того, согласно требованиям, приведенным в статье 21.05 Европейских предписаний, суда, предназначенные для буксировочных операций, должны оснащаться буксирными устройствами: буксирной лебедкой или буксирным гаком, а также должны быть предусмотрены защитные буксирные арки [17].

Требования Правил РРР к буксирному устройству условно можно разделить на два подтипа: требования к буксирам (буксирам-толкачам) и требования к оборудованию судов устройствами, позволяющими взять их на буксир (кнехты, битенги, буксирные клюзы и т.п.) [16].

Буксирное устройство буксиров в соответствии с требованиями Правил РРР должно включать:

- как минимум два приспособления для закрепления буксирного троса;
- буксирный трос;
- буксирные арки и подобные конструкции, направляющие трос;
- ограничители буксирного троса.

При этом в зависимости от класса буксира и мощности его ГД установлены требования по типу (снабжению) буксирными лебедками (лебедки с приводом от источника энергии, автоматические буксирные лебедки).

Прочностные характеристики тросов для буксирных судов по Правилам РРР необходимо определять с учетом значения расчетной тяги на гаке в швартовном режиме, принимаемой в соответствии с гидродинамическими расчетами, или же по прототипу (результатам испытаний головного судна).

Вместе с тем расчетную тягу на гаке допускается принимать не менее значения, определенного по формуле, кН:

$$F = 0,16P_e,$$

где P_e — суммарная мощность ГД, кВт.

Минимальное разрывное усилие буксирного троса в соответствии с Правилами РРР, определяется, кН:

$$F_0 = kF,$$

где k — коэффициент, принимаемый:

- 5 — при расчетной тяге на гаке менее 120 кН;
- 4 — при расчетной тяге на гаке более 120 кН;
- 3 — для тросов автоматических буксирных лебедок;
- 6 — для тросов из синтетических и растительных волокон [16].

Как следует из приведенных формул, минимальное значение допускаемого разрывного усилия буксирного троса находится в диапазоне 0,48 - 0,96 от суммарной мощности ГД, что «жестче» требований стандарта ES-TRIN.

Длина буксирного троса по Правилам РРР должна выбираться в зависимости от условий и района плавания с учетом следующего:

- для судов класса «М» - не менее 180 м;
- для судов класса «О» - не менее 100 м;
- для судов классов «Р», «Л» - не менее 60 м.

В качестве иллюстрации на рисунке 3 показаны результаты сравнения значений разрывного усилия буксирного троса, рассчитанных по Правилам РРР и Европейским предписаниям для судов класса «О» проектов ЛС-56А, 941, Р3191, Р18А, С07521 [18].

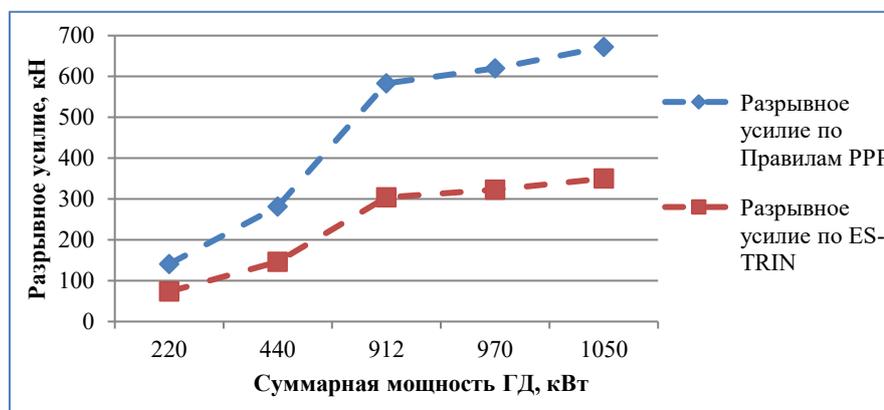


Рис. 3. Результаты сравнения разрывного усилия буксирного троса, рассчитанного по Правилам РРР и Европейским предписаниям для судов класса «О»

Структура требований в отношении буксирного устройства буксиров по стандарту ES-TRIN в сопоставлении с требованиями Правил РРР для удобства приведена на рисунке 4.



Рис. 4. Структура предписаний стандарта ES-TRIN в отношении буксирного устройства буксиров в сопоставлении с требованиями Правил РРР

По результатам анализа требований Правил РРР и Европейских предписаний в отношении буксирного устройства буксиров можно сделать вывод, что требования Правил РРР более «жесткие», а стандарт уровня безопасности, заложенный в них, значительно выше. На наш взгляд, связано это с особенностями эксплуатации судов на ВВП РФ, в том числе с неразвитостью сервисных служб, большими расстояниями

между пунктами погрузки и назначения, невысокой плотностью расположения населенных пунктов, что отразилось на требованиях к резервированию буксирного оборудования (не менее двух приспособлений), а также с ветро-волновым режимом (в особенности в водохранилищах, озерах), что, в свою очередь, отразилось на требованиях к длине буксирного троса, его прочностных характеристиках, типу буксирных лебедок (с приводом от источников энергии, автоматические и т. п.).

Рулевое устройство

Стандарт ES-TRIN в части рулевого устройства содержит требования общего характера и не затрагивает вопросы конструкции, размеров и прочности элементов устройства, ответственных и крепежных деталей и т. п. Эти требования в той или иной степени отражены в Правилах PPP.

Наряду с этим в стандарте ES-TRIN указано, что движительно-рулевой комплекс судна должен обеспечивать маневренность не менее той, которая требуется главой 5 «Маневренность» [17]. Требования главы 5 «Маневренность» стандарта ES-TRIN распространяются на суда, оборудованные двигателями. В свою очередь, требования Правил PPP в части маневренности судов распространяются только на самоходные грузовые суда (суда, перевозящие грузы) длиной 40 м и более, а также на суда длиной 20 м и более, перевозящие пассажиров.

В таблице 3 приведены критерии оценки маневренности судна по стандарту ES-TRIN в сопоставлении с требованиями Правил PPP [16, 17].

Таблица 3

№	Требования ES-TRIN	Правила PPP
1	Критерий скорости на переднем ходу. Суда должны развивать скорость не менее 13 км/ч.	В Правилах PPP требования к скорости на переднем ходу судов внутреннего плавания не предъявляются.
2	Критерий поворотливости. Поворотливость судов считается достаточной, если во время маневра поворота при движении судна против течения при начальной скорости относительно воды 13 км/ч соблюдаются предельные значения для торможения судна, движущегося вниз по течению, определенные для критерия остановки.	Критерий поворотливости. Поворотливость судов считается достаточной, если выполняется условие: $(D_{ц}/L)_{\min} \leq 2$, где $D_{ц}$ — наименьший возможный диаметр циркуляции. L — длина судна по КВЛ.
3	Критерий способности изменять курс (уклонение от столкновения). Определяется путем сравнения значений скоростей поворота (r) и времени поворота (t), полученных в процессе выполнения маневра («зигзаг») путем последовательной перекладки руля на определенный угол (δ), и сопоставления этих значений с допускаемыми.	В Правилах PPP подобный критерий не рассматривается. Однако согласно указаниям по проведению натуральных испытаний, приведенным в Правилах PPP, маневр «зигзаг» должен выполняться. Методика его проведения достаточно близка к методике, отраженной в ES-TRIN, но в процессе испытаний измеряются угол зарыскивания (θ) и время задерживания (t). При этом допускаемых значений θ , t в Правилах PPP не установлено.
4	Критерий остановки. Тормозной путь не должен превышать значений: 550 м — для судов и составов длиной более 110 м или шириной более 11,45 м в проточной воде (скорость течения 1,5 м/с);	Критерий экстренного торможения. Путь торможения не должен превышать значения, определяемого по формуле, м, $S_{\text{эт}} = 30,7 \sqrt[3]{V} + 1,28L$, где V — водоизмещение судна, м ³ ;

	350 м — для судов и составов длиной более 110 м или шириной более 11,45 м в тихой воде (скорость течения 0,2 м/с); 480 м — для судов и составов длиной 110 м и менее или шириной 11,45 м и менее в проточной воде (скорость течения 1,5 м/с); 305 м — для судов и составов длиной 110 м и менее или шириной 11,45 м и менее в тихой воде (скорость течения 0,2 м/с).	L — длина судна, м. <i>Результаты сравнения значений пути торможения, рассчитанных для некоторых проектов судов с классом PPP, приведены в таблице 4 и на рисунке 5.</i>
5	Критерий ходкости на заднем ходу (скорость не менее 6,5 км/ч).	В Правилах PPP подобный критерий не рассматривается, но согласно указаниям по проведению натурных испытаний, приведенным в Правилах PPP, испытания по управляемости судна на заднем ходу проводятся.

Помимо требований (критериев), приведенных в таблице 3, в Правилах PPP установлены еще три критерия, аналогичных которым в стандарте ES-TRIN нет, а именно:

- критерий устойчивости на курсе:
диаметр установившейся циркуляции должен составлять более десяти длин судна; при нулевом угле перекадки руля судно должно двигаться прямым курсом (не входит в циркуляцию);
- критерий управляемости при неработающих двигателях (после остановки ГД судно может быть выведено из установившейся циркуляции (с углом перекадки руля 20°) действием главных средств управления;
- критерий управляемости при ветре:
скорость ветра в районе эксплуатации, при котором возможно движение судна прямым курсом с номинальной частотой вращения движителей, составляет для судов класса «Р», «Л» не менее 14 м/с, а для судов классов «М», «О» - не менее 19 м/с;
удельная тяга подруливающего устройства составляет для грузовых судов не менее 0,03 и 0,04 для пассажирских судов [16].

Таблица 4

Расчетные значения пути экстренного торможения для судов с классом PPP

Проект	V, м ³	L × B × H × T, м	S ^{PPP}	S ^{ES-TRIN}
Грузовые суда				
414А	799	63,6 × 10,0 × 2,0 × 1,5	366	480
573Б	1690	77,15 × 11,00 × 2,80 × 1,71	464	480
Р97	2540	90,00 × 15,00 × 2,80 × 2,25	534	480
1553	4305	115,2 × 13,0 × 5,8 × 3,5	646	550
507	6755	135,0 × 16,5 × 5,5 × 3,5	753	550
Пассажирские суда				
1083	67,4	31,00 × 6,00 × 1,10 × 0,45	164	480
СМ273Т	295,0	46,20 × 7,00 × 2,60 × 1,33	263	480
1862	1156,0	63,0 × 9,6 × 3,7 × 2,52	402	480
Ку065	1345,0	83,00 × 13,50 × 4,00 × 1,63	445	480
301	3570,0	118,00 × 16,00 × 4,50 × 2,76	620	550
Примечание. L, B, H, T, — длина, ширина, высота борта, осадка судна;				

S^{PPP} , $S^{ES-TRIN}$ — расчетные значения пути экстренного торможения по Правилам PPP и стандарту ES-TRIN, м.

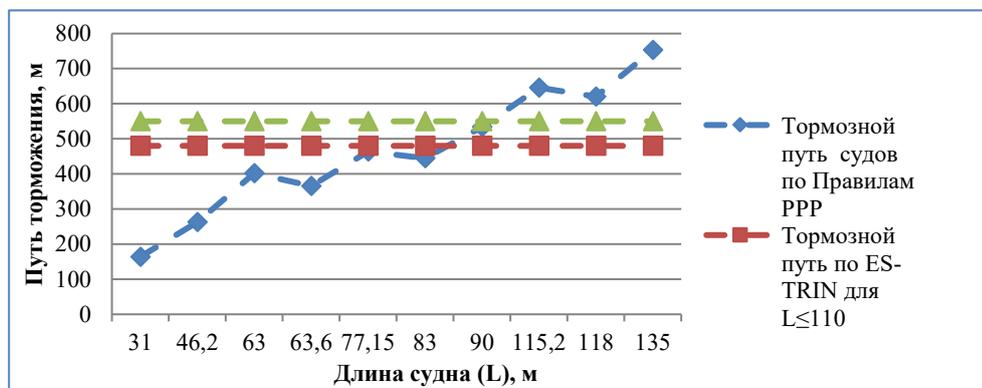


Рис. 5. Результаты сравнения значений пути экстренного торможения, рассчитанного для проектов судов с классом PPP

Результаты сопоставительного анализа в части рулевого устройства сводятся к следующему:

- требования к рулевому устройству, приведенные в Европейских предписаниях в той или иной степени отражены в Правилах PPP;
- сравнение требований Правил PPP и Европейских предписаний в части маневренности показало, что область распространения, критерии, используемые для оценки, и методики испытаний значительно отличаются, что делает затруднительным сопоставление уровней стандарта безопасности судов, эксплуатирующихся на ВВП РФ и ЕВВП.

Заключение

Обобщая результаты сопоставительного анализа требований Правил PPP и стандарта ES-TRIN, представленные выше для каждого раздела, можно сформулировать следующие выводы:

1. Условия эксплуатации судов на ВВП РФ и ЕВВП в определенной мере различны.
2. В Европейских предписаниях приведены преимущественно требования общего характера, не затрагивающие вопросы конструкции, размеров, прочности элементов устройств и т. п. Требования Правил PPP более детализированы как по структуре, так и по объему и содержанию. При этом практически все требования к судовым устройствам, приведенные в Европейских предписаниях, в той или иной степени отражены в Правилах PPP.
3. Ввиду отличающихся условий эксплуатации в требованиях Правил PPP и Европейских предписаний реализованы различные принципы и подходы по определению якорного снабжения, буксирного устройства, критериям маневренности. В частности:

- методики по определению массы якорей, приведенные в Правилах PPP и стандарте ES-TRIN, имеют принципиальные отличия, которые не позволяют получить сопоставимые результаты в отношении стандарта безопасности. Однако в большинстве случаев при расчетах суммарной массы якорей для конкретных проектов судов требования Европейских предписаний более «жесткие». В свою

очередь, требования, предъявляемые Речным Регистром к длине якорных цепей значительно «жестче» аналогичных требований согласно стандарту ES-TRIN. В Правилах PPP в части якорного снабжения акцент сделан не на более массивный якорь, а на более длинные якорные цепи;

- в отношении буксирного устройства требования Правил PPP более «жесткие», например по степени резервирования буксирного оборудования (не менее двух приспособлений), по требованиям к прочностным характеристикам буксирного троса, по требованиям к типу буксирных лебедок (с приводом от источников энергии, автоматические и т. п.);

- в отношении требований к маневренности судов результаты сопоставительного анализа показали, что область распространения, критерии, используемые для оценки, и методики испытаний значительно отличаются, что делает затруднительным сопоставление уровней стандарта безопасности судов.

4. Отмеченные в статье отличия в подходах и требованиях Правил PPP и ES-TRIN могут быть рассмотрены в качестве предпосылок для поиска новых решений по совершенствованию нормативной базы Речного Регистра в части комплексного подхода к обеспечению стандарта безопасности, заложенного в Правилах PPP, для судов, эксплуатация которых предполагается не только на ВВП РФ, но и на ЕВВП.

Литература

1. Кодекс внутреннего водного транспорта Российской Федерации от 07.03.2001 N 24-ФЗ (ред. от 14.06.2020) [Электронный ресурс].- Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_30650/ (дата обращения 18.08.2020 г.)
2. Федеральный закон «О внесении изменений в Кодекс внутреннего водного транспорта Российской Федерации» от 11.07.2011 N 203-ФЗ [Электронный ресурс].- Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_116565/ (дата обращения 18.08.2020 г.)
3. Европейское соглашение о важнейших внутренних водных путях международного значения [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/901784389> (дата обращения 18.08.2020 г.)
4. Приказ Минтранса РФ от 25 сентября 2012 г. N 355 «О наделении федерального автономного учреждения "Российский Речной Регистр" полномочиями на классификацию и освидетельствование судов, подлежащих государственной регистрации, за исключением маломерных судов, используемых в некоммерческих целях» [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://base.garant.ru/70250794/> (дата обращения 18.08.2020 г.)
5. About CESNI [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.cesni.eu/en/about-cesni/> (дата обращения 18.08.2020 г.)
6. Technical requirement [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.cesni.eu/en/technical-requirements/> (дата обращения 18.08.2020 г.)
7. Transmitted by the European Commission [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2016/sc3wp3/ECE-TRANS-SC3-2016-inf02e.pdf/> (дата обращения 18.08.2020 г.)
8. Directive (EU) 2016/1629 of the European Parliament and of the Council of 14 September 2016 laying down technical requirements for inland waterway vessels, amending Directive 2009/100/EC and repealing Directive 2006/87/EC [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016L1629&from=EN> (дата обращения 18.08.2020 г.)
9. Трунин Е.Г., Ефремов Н.А., Поспелов В.И. 120 лет классификации речных судов в России. Российский Речной Регистр .- 2019.
10. Сазонов А.А. Специальная лодка ЕГС. Ч. VI. Нижняя Волга : учеб. пособие для студ. и курсан. оч. и заоч. обуч. высш. и сред. спец. учеб. завед. : специальность 180402 «Судовождение» / А.А. Сазонов, В.С. Добровольский. – Н. Новгород : Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2015. – 60 с
11. Сазонов А.А. Специальная лодка ЕГС: Ч. II.: учебное пособие по дисциплине «Специальная лодка района плавания» для студентов очной и заочной формы обучения

- по специальности 180402 «Судовождение» /А.А.Сазонов, В.С. Добровольский. – Н. Новгород: Изд-во ФГОУ ВПО ВГАВТ, 2008.
12. Сазонов А.А. Специальная лоция ЕГС : Ч. III. Волго-Балтийский канал :учеб. пособие для студ. высших и средних специальных учеб. заведений специальности 180402 «Судовождение» оч. и заоч. обучения / А.А. Сазонов, В.С. Добровольский. – Н. Новгород : Изд-во ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2009. – 44 с.
 13. Фролов, Р.Д. Лоция единой глубоководной системы / Р.Д. Фролов, Г.М. Шмелев. – М.: Транспорт, 1991. – 269 с.
 14. Перечень основных характеристик и параметров сетей водных путей категории Е «Синяя книга» [Электронный ресурс].- Режим доступа: <https://www.unec.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2012/sc3wp3/ECE-TRANS-SC3-144rev2r.pdf> (дата обращения 22.08.2020 г.)
 15. Гидрологический справочник реки Дунай [Электронный ресурс].- Режим доступа: http://www.danubecommision.org/uploads/doc/publication/2018/spravocnik_1921_2010.pdf (дата обращения 22.08.2020 г.)
 16. Российский Речной Регистр. Правила (в 5-и томах). – Правила классификации и постройки судов (ПКПС). – М.: Российский Речной Регистр, 2019 – 1506 с.
 17. European Standard laying down Technical Requirements for Inland Navigation vessels (ES-TRIN) [Электронный ресурс].- Режим доступа: https://www.cesni.eu/wp-content/uploads/2018/05/ES_TRIN_2019_en.pdf (дата обращения 22.08.2020 г.)
 18. Справочник по серийным транспортным судам. Том 2: Сухогрузные теплоходы, танкеры и рефрижераторы.-1973. - 294 с.

References

1. Kodeks vnutrennego vodnogo transporta Rossiyskoy Federatsii ot 07.03.2001 N 24-FZ (red. ot 14.06.2020) Web. 18 Aug. 2020 URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_30650
2. Federalnyiy zakon «O vnesenii izmeneniy v Kodeks vnutrennego vodnogo transporta Rossiyskoy Federatsii» ot 11.07.2011 N 203-FZ Web. 18 Aug. 2020 URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_116565/
3. Evropeyskoe soglasenie o vazhneyshih vnutrennih vodnyih putyah mezhdunarodnogo znacheniya Web. 18 Aug. 2020 URL: <http://docs.cntd.ru/document/901784389>
4. Prikaz Mintransa RF ot 25 sentyabrya 2012 g. N 355 «O nadelenii federalnogo avtonomnogo uchrezhdeniya "Rossiyskiy Rechnoy Registr" polnomochiyami na klassifikatsiyu i osvidetelstvovanie sudov, podlezhaschih gosudarstvennoy registratsii, za isklyucheniem malomernyih sudov, ispolzuemyih v nekommercheskih tselyah Web. 18 Aug. 2020 URL: <https://base.garant.ru/70250794/>
5. About CESNI Web. 18 Aug. 2020 URL: <https://www.cesni.eu/en/about-cesni/>
6. Technical requirement Web. 18 Aug. 2020 URL: <https://www.cesni.eu/en/technical-requirements/>
7. Transmitted by the European Commission Web. 18 Aug. 2020 URL: <https://www.unec.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2016/sc3wp3/ECE-TRANS-SC3-2016-inf02e.pdf>
8. Directive (EU) 2016/1629 of the European Parliament and of the Council of 14 September 2016 laying down technical requirements for inland waterway vessels, amending Directive 2009/100/EC and repealing Directive 2006/87/EC Web. 18 Aug. 2020 URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016L1629&from=EN>
9. Trunin E.G., Efremov N.A., Pospelov V.I. 120 let klassifikatsii rechnyih sudov v Rossii. Rossiyskiy Rechnoy Registr . 2019.
10. Sazonov A.A., Dobrovolskiy V.S. «Spetsialnaya lotsiya EGS»: Ch. VI. Nizhnyaya Volga : ucheb. posobie dlya stud. i kursan. och. i zaoch. obuch. vyssh. i sred. spets. ucheb. zaved. : spetsialnost 180402 «Sudovozhdenie»: N. Novgorod : Izd-vo FGBOU VO Volzhskiy gosudarstvenniy universitet vodnogo transporta, (2015). - 60 p
11. Sazonov A.A., Dobrovolskiy V.S. «Spetsialnaya lotsiya EGS»: Ch. II.: uchebnoe posobie po distsipline «Spetsialnaya lotsiya rayona plavaniya» dlya studentov ochnoy i zaochnoy formy

- obucheniya po spetsialnosti 180402 «Sudovozhdenie».: N. Novgorod: Izd-vo FGOU VPO Volzhskaya gosudarstvennaya akademiya vodnogo transporta, 2008.
12. Sazonov A.A., Dobrovolskiy V.S. «Spetsialnaya lotsiya EGS».: Ch. III. Volgo-Baltiyskiy kanal :ucheb. posobie dlya stud. vyisshih i srednih spetsialnyih ucheb. zavedeniy spetsialnosti 180402 «Sudovozhdenie» och. i zaoch. Obucheniya.: N. Novgorod : Izd-vo FGOU VPO Volzhskaya gosudarstvennaya akademiya vodnogo transporta, 2009. – 44 p.
 13. Frolov, R.D., Shmelev. G.M. «Lotsiya edinoi glubokovodnoy sistemy» M.: Transport, 1991. – 269 p.
 14. Perechen osnovnykh karakteristik i parametrov setey vodnykh putey kategorii E «Sinyaya kniga» Web. 18 Aug. 2020 URL: <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2012/sc3wp3/ECE-TRANS-SC3-144rev2r.pdf>
 15. Hidrologicheskiy spravochnik reki Dunay Web. 18 Aug. 2020 URL: http://www.danubecommission.org/uploads/doc/publication/2018/spravocnik_1921_2010.pdf
 16. Rossiyskiy Rechnoy Registr. Pravila (v 5-i tomah). – Pravila klassifikatsii i postroyki sudov (PKPS). – M.: Rossiyskiy Rechnoy Registr, 2019 – 1506 p.
 17. European Standard laying down Technical Requirements for Inland Navigation vessels (ES-TRIN) Web. 18 Aug. 2020 URL: https://www.cesni.eu/wp-content/uploads/2018/05/ES_TRIN_2019_en.pdf
 18. Spravochnik po seriynym transportnyim sudam. Tom 2: Suhogruzye teplohody, tankery i refrizheratory.-1973. - 294 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Галочкин Дмитрий Александрович, 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: gal-dmitrii@yandex.ru

Dmitriy A. Galochkin, Cand Sci (Tech), Associate Professor of the Department of «Design and shipbuilding technology», Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951, Russia.

Акишенков Михаил Сергеевич, магистрант кафедры «Проектирования и технологии постройки судов», Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

Mikhail S. Akishenkov, student of the Department of «Design and shipbuilding technology», Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951, Russia.

Статья поступила в редакцию 26.11.2020; опубликована онлайн 23.03.2021.
Received 26.11.2020; published online 23.03.2021

УДК 629.122

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi66.158>

Анализ устойчивости комбинированных судов на стадии исследовательского проектирования

И. А. Гуляев¹

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

Е. П. Роннов²

¹ФАУ «Российский Речной Регистр», г. Москва, Россия

²Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Приводится метод анализа устойчивости комбинированного судна типа танкер/судно-площадка на стадии исследовательского проектирования. Отмечается, что не все их основные мореходные и эксплуатационные качества являются результатом простого сложения качеств наливного судна и площадки. Имеет место их взаимное влияние, что следует учитывать при анализе устойчивости в решениях многовариантных оптимизационных задач внешнего и внутреннего проектирования таких судов. Это привело к необходимости корректировки известных методов анализа устойчивости на начальных стадиях проектирования судна, что и составило цель выполненной работы и ее новизну.

Учитывая многовариантность задачи и конструктивный тип корпуса судна, принят способ оценки устойчивости, анализируя предельное значение метацентрической высоты, рассчитываемой из условия обеспечения требований Российского Речного Регистра по допустимому углу крена при статическом действии ветра. Для учета нелинейности диаграммы устойчивости при наклонениях до углов входа палубы в воду и выхода скулы из воды предлагается использовать приближенный способ определения метацентрического радиуса.

Предложенный метод оценки устойчивости комбинированного судна рекомендуется использовать на стадии обоснования и анализа их главных элементов, как ограничение в задачах математического моделирования оптимизации данного типа судов. Он позволяет уже на этапе исследовательского проектирования исключать из дальнейшего рассмотрения варианты, не удовлетворяющие уровню этого мореходного качества.

Ключевые слова: комбинированное судно, танкер/судно-площадка, обеспечение устойчивости, метацентрическая высота, оптимизация главных размеров.

Stability analysis of combined vessels at the stage of research design

Ilya A. Gulyaev¹

Evgeniy P. Ronnov²

¹Russian River Register, Moscow, Russia

²Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. A method of stability analysis of a combined tanker / platform vessel at the stage of research design is presented. It is noted that not all of their main seaworthiness and operational qualities are the result of a simple addition of the qualities of a tanker and a platform. Their mutual influence takes place, which should be taken into account when analyzing stability in solutions of multivariate optimization problems of external and internal design of such ships. This has led to the need to adjust the known methods of stability

analysis at the initial stages of ship design, which has been the purpose of the work performed and its novelty.

Taking into account the multivariance of the problem and the structural type of the ship's hull, a method for assessing stability has been adopted by analyzing the limiting value of the metacentric height calculated from the condition of meeting the requirements of the Russian River Register for the permissible bank angle under static wind action. Considering the nonlinearity of the stability diagram at inclinations to the angles of the deck entry into the water and the exit of the chine from the water, it is proposed to use an approximate method for determining the metacentric radius.

The proposed method for assessing the stability of a combined vessel is recommended to be used at the stage of justification and analysis of their main elements, as a limitation in the problems of mathematical modeling of optimization of this type of vessels. It allows already at the stage of research design to exclude from further consideration options that do not meet the level of this seaworthiness.

Keywords: combined vessel, tanker / platform vessel, stability assurance, metacentric height, optimization of main dimensions.

Введение

Большинство жидких грузов, перевозимых на судах внутреннего и смешанного (река-море) плавания, это нефть и различные нефтепродукты. Существенным недостатком нефтеналивных судов является их односторонняя загрузка нефтегрузом и обратный порожний пробег, что отрицательно отражается на экономической эффективности этого флота. В морском торговом судоходстве используются комбинированные суда, способные в прямом рейсе везти жидкий груз, а в обратном – сухой. Их архитектурно-конструктивной особенностью является размещение грузовых помещений как для жидких, так и для сухих грузов в корпусе [1], [2], [3], [4], [5]. В отечественной практике речных перевозок использовались комбинированные суда типа нефтерудовозы, у которых сухие и жидкие грузы в разных рейсах размещались в корпусе [6]. Однако их грузовые танки не имели вторых бортов и второго дна. Установка в их корпусе требуемых конструкций приводила к существенному уменьшению грузоподъемности танков жидких грузов. С повышением требований по защите окружающей среды в настоящее время эксплуатация нефтерудовозов запрещена. В связи с ограничениями на главные размерения судна, накладываемыми габаритами внутренних водных путей, являются перспективными комбинированные суда типа танкер/судно-площадка. У них жидкий груз размещается как на обычном танкере в корпусе, а сухой (навалочный либо тарноштучный) в обратном рейсе – на грузовой площадке над танками. Построенная серия таких судов проекта RST54 показала их эффективность в определенных условиях эксплуатации [7].

Постановка задачи

Рассматривая вопросы исследовательского проектирования, при которых решаются задачи внутреннего и внешнего проектирования таких судов, следует иметь в виду, что их мореходные и эксплуатационные качества не всегда являются результатом простого сложения качеств наливного судна и площадки. Это следует учитывать и при анализе обеспечения остойчивости, одного из важнейших мореходных качеств, поскольку от ее уровня зависит безопасность людей и грузов, находящихся на судне, экологическая безопасность.

Методика нормирования остойчивости судов внутреннего и смешанного (река-море) плавания [8] заключается в сопоставлении значения внешнего кренящего момента, приложенного либо статически, с моментом, кренящим судно до допустимого (нормируемого) угла. Она хорошо отработана и для ее реализации требуется наличие соответствующей подробной информации, получаемой, прежде

всего, с использованием теоретического чертежа (ТЧ). Однако на стадиях, когда с использованием методов математического моделирования решаются многовариантные оптимизационные задачи обоснования основных элементов и характеристик судна, не всегда реально иметь соответствующие варианты теоретического чертежа. Поэтому для оценки остойчивости в этом случае можно использовать приближенные аналитические методы построения ТЧ, например, [9], [10], [11], [12] и др. На стадиях предварительного анализа главных элементов судна уровень остойчивости оценивается в рамках метода начальной остойчивости обобщенными показателями в виде неравенств:

$$h_0 \geq h_{кр}, \text{ или для данного судна } z_g \leq z_{g_{кр}} \quad (1)$$

где z_g, h_0 – аппликата центра тяжести и начальная метацентрическая высота при рассматриваемом состоянии нагрузки судна;

$z_{g_{кр}}, h_{кр}$ – предельные значения z_g и h_0 с точки зрения обеспечения остойчивости.

Учитывая приближенность методов расчета z_g и h_0 и стадию проектирования неравенства (1), как показано в нашей работе [14], правильнее записывать с учетом запаса остойчивости:

$$z_g \leq z_{g_{кр}} + \Delta h \quad \text{и} \quad h_0 \geq h_{кр} + \Delta h, \quad (2)$$

где Δh – запас остойчивости.

Отмеченные методы являются приближенными; при их разработке учитывались особенности архитектурно-конструктивного типа конкретных судов, и поэтому они требуют корректировки применительно к комбинированным судам, что и рассмотрено ниже.

Разработка метода

Для верхнего (предварительного) уровня анализа достаточности остойчивости, используя условие (1), нужно уточнить особенность расчета h_0 и $h_{кр}$ комбинированного судна.

Начальная метацентрическая высота h_0 находится из классического (по Эйлеру) уравнения начальной остойчивости

$$h_0 = r_0 + z_c - z_g$$

Малый метацентрический радиус r_0 и аппликата центра величины z_c рассчитываются по известным решениям, устанавливающим их связь с главными размерениями и параметрами формы корпуса

$$r_0 = f_r(\alpha, \delta) \frac{B^2}{T}, \quad z_c = f_z(\alpha, \delta) T$$

Для судов с полными обводами, к которым относятся комбинированные суда, можно использовать решение Фан-дер-Флита и Л. Эйлера [8]

$$r_0 = \frac{B^2}{11,4T} \cdot \frac{\alpha^2}{\delta}, \quad z_c = \frac{1}{1 + \delta/\alpha} \cdot T$$

Значения аппликаты центра тяжести z_g при возможных состояниях нагрузки следует находить с учетом особенностей архитектурно-конструктивного типа комбинированного судна танкер/судно-площадка. Так аппликата z_g для варианта обратной загрузки, когда танки порожние, а сухой груз размещается на грузовой площадке, может быть рассчитана

$$z_g = (D_0 z_{g_0} + P_{гр} z_{гр}) D^{-1},$$

где D_0, z_{g_0} – водоизмещение и аппликата центра масс комбинированного судна порожнем;

$P_{гр}, z_{гр}$ – грузоподъемность по сухому грузу и аппликата центра масс этого груза;

D – полное водоизмещение в обратном рейсе.

Аппликата центра масс сухого груза с учетом возможной нагрузки его с «горкой» и угла естественного откоса 45° (щебень, гравий) рассчитывается по выражению

$$z_{гр} = 0,9(0,45h_{гп} + H) + (H + 0,9h_{гп} + 0,17b_{гп}),$$

где $h_{гп}, b_{гп}$ – высота ограждения и ширина грузовой палубы;

H – высота борта судна.

При перевозке других навалочных грузов угол естественного откоса меньше, что приведет к уменьшению $z_{гр}, z_g$ и увеличению h_0 .

Определение критического (предельного) уровня начальной остойчивости через предельное значение метацентрической высоты комбинированного судна в соответствии с Правилами [8] допустимо определить из условия действия на судне статического ветра, при котором допустимый угол крена не должен превышать $0,8$ угла заливания или угла входа кромки палубы в воду, в зависимости от того, что меньше. Нефтеналивные суда, так же, как и суда-площадки являются низкобортными. Поэтому допустимый угол крена этих судов, так же, как и комбинированных, имеет небольшие значения и поэтому наклонение до таких углов можно рассматривать в рамках метода начальной остойчивости. В соответствии с этим будем иметь

$$M_{кр} \leq M_{доп} \tag{3}$$

Момент, кренящий от статического ветра находится по [8]

$$M_{кр} = 0,001 \cdot 0,47 p_g S z_c,$$

где p_g, S, z_c – условное расчетное давление ветра, площадь парусности и приведенное плечо кренящего момента.

Допустимый момент - кренящий момент до допустимого угла крена - численно равняется восстанавливающему моменту при этом угле

$$M_{доп} = D h_0 \sin \theta$$

Отсюда критическое значение начальной метацентрической высоты будет

$$h_{кр} = \frac{M_{кр}}{D \cdot \sin \theta_{доп}}$$

Учитывая, что $\theta_{доп}$ по углу заливания зависит от конструктивных решений по расположению открытых отверстий, и они в основном расположены на главной палубе и выше, за допустимый угол можно принять угол входа палубы в воду.

При углах входа палубы в воду больше 12° , когда нелинейность диаграммы плеч может привести к заметной погрешности в оценке остойчивости, например, при ходе порожнем, допустимый момент следует находить с использованием диаграммы плеч статической остойчивости

$$M_{доп} = l_{доп} \cdot D,$$

где $l_{доп}$ – плечо статической остойчивости, принимаемое по диаграмме $l = f(\theta)$ при допустимом угле крена. Необходимые для ее расчета построения плечи остойчивости веса и формы зависят от координат центра величины, являющихся функцией угла крена [11]

$$y_c = \int_0^\theta r_\theta \cos \theta d\theta$$

$$z_c - z_{c0} = \int_0^\theta r_\theta \sin \theta d\theta,$$

где r_θ – метацентрический радиус при угле крена θ ; z_{c0} – аппликата центра величины при угле крена 0 градусов.

Значение метацентрического радиуса при $\theta=0$ может быть найдено по формуле Фан-дер-Флита, а при произвольном θ - по предложению В.Л. Поздюнина как соотношение относительно r_θ

$$r_\theta = k_\theta \cdot r_0$$

Коэффициент метацентрического радиуса при различных углах равнообъемного наклона для полных грузовых судов внутреннего и смешанного (река-море) плавания с вертикальными бортами и плоским днищем, как показано в [13], может быть рассчитан по формуле

$$k_\theta = \frac{(0,5\delta + 0,415)B_\theta}{1,05\alpha^2 B^3} (B_\theta^2 + 12 \eta_\theta),$$

где δ, α – коэффициенты полноты водоизмещения и площади действующей ватерлинии, соответствующей расчетному водоизмещению D ;

B_θ – ширина наклонной ватерлинии при угле крена θ ;

B – расчетная ширина судна;

η_θ – функция, характеризующая расстояние между центральными осями действующей и вспомогательной ватерлинии при наклоне судна на угол крена θ .

Величины B_θ и η_θ для актуальных в данном случае двух фаз наклона судна $\theta_{вс} \geq \theta \leq \theta_{вп}$ и $\theta_{вс} < \theta \leq \theta_{вп}$ рассчитываются по следующим формулам

$$B_\theta = \begin{cases} \frac{B_\theta}{\cos \theta} \\ \left(\frac{B}{2} + \frac{T}{\operatorname{tg} \theta}\right) \cos^{-1} \theta \end{cases} \quad \eta_\theta = \begin{cases} 0 & \text{если } \theta_{вс} \geq \theta \leq \theta_{вп} \\ \frac{B}{2} - \frac{T}{\sin \theta} & \text{если } \theta_{вс} < \theta \leq \theta_{вп} \end{cases}$$

где $\theta_{вс}, \theta_{вп}$ – угол выхода скулы из воды и входа палубы в воду соответственно;

H, T – высота борта судна и осадка.

Рассчитав k_θ для ряда θ , получаем значения r_θ для этих углов наклона, координаты центра величины $y_{c\theta}$ и z_c и величину плеч статической остойчивости. Представлением их в виде функции $l = f(\theta)$, решается задача определения $l_{доп}$ по допускаемому углу крена и проверяется выполнение условия (3).

Заключение

Предложенный метод предварительной оценки достаточности остойчивости главных элементов комбинированного судна типа танкер/судно-площадка в целом соответствует критериям, принятым в [8]. Он реализуем в рамках математической модели оптимизации этого типа судна, рассматриваемой при решении задач исследовательского проектирования и позволяет уже на этом этапе исключать из дальнейшего рассмотрения варианты, не удовлетворяющие этому важному мореходному качеству.

Литература

1. Железяков Ж.К. комбинированные суда для перевозки нефти и навалочных грузов / Железяков Ж.К. // Ленинград: Судостроение, 1976.
2. Козлов С.Н. Головной крупнотоннажный нефтерудовоз «Борис Бутома» / Козлов С.М., Цыбенко А.Ф. // Журнал «Судостроение», № 12, 1977.
3. Burneett A. Toown a combination ship «Marine desigen international», march 26, 1971, P.19.
4. Dorman W. Combination bulk carriers «Marine technology», 1966, № 4, P.409-453.
5. Marie Donet. Combined ships: an empirical investigation about versatility, Maritime Policy Management, 1999, VOL. 26.NO.3, p.231-248.
6. Животовский А.А. Особенности конструкции головного теплохода «Нефтерудовоз-1» / Животовский А.А., Шалкин М.К., Самунин В.Г. // Журнал «Судостроение», № 5, 1971.
7. 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. // Журнал «Судостроение», № 4, 2017.
8. Российский Речной Регистр в 5 т. Т.2 / Российский Речной Регистр. – М., 2019. – 432 с.
9. Благовещенский С.Н. Справочник по статике и динамике корабля. Статика корабля. Том 1 / С.Н. Благовещенский, А.Н. Холодилин. – Л.: Судостроение, 1976. – 312 с.
10. Севостьянов Н.Б. Остойчивость промысловых судов / Н.Б. Севостьянов. – Л.: Судостроение. 1970. – 200 с.
11. Алферьев М.Я. Теория корабля / М.Я. Алферьев. – М.: Речной транспорт, 1959. – 291 с.
12. Ногид Л.М. Теория проектирования судов / Л.М. Ногид. – Л.: Судпромгиз. 1955. – 497 с.
13. Роннов Е.П. Расчет характеристик остойчивости грузовых судов внутреннего плавания на ранних стадиях проектирования / Е.П. Роннов // Труды ГИИВТа, 1985. – Вып. 211. – С. 151–159.
14. Роннов Е.П. Анализ запаса остойчивости судна внутреннего и смешанного (река-море) плавания / Е.П. Роннов, Ю.А. Кочнев, И.А. Гуляев // Журнал «Морские интеллектуальные технологии», № 4, 2020 – 56-61 с.

References

1. Zhelezjakov Zh. K. Kombinirovannye suda dlja perevozki nefi i navalochnyh gruzov. Leningrad, «Sudostroenie», 1976.
2. Kozlov S.M. Cybenko A. F. Golovnoj krupnotonnazhnyj nefterudovoz «Boris Butoma», zhurnal «Sudostroenie», No 12, 1977.
3. Burneett A. Toown a combination ship «Marine desigen international», march 26, 1971, P.19.
4. Dorman W. Combination bulk carriers «Marine technology», 1966, № 4, P.409-453.
5. Marie Donet. Combined ships: an empirical investigation about versatility, Maritime Policy Management, 1999, VOL. 26. NO.3, p.231-248.
6. Zhivotovskij A.A. Shalkin M.K. Samunin V.G. Osobennosti konstrukcii golovnogo teplohoda «Nefterudovoz-1», zhurnal «Sudostroenie», No 5, 1971.
7. Egorov G. V. Tonyuk V.I., Durnev E. Y. "Saturated" multi-purpose P.RST54 ships for transportation of oil and dry cargo, as containers, rolling equipment and special-purpose cargo and other containers. Marine Engineering Bureau, zhurnal «Sudostroenie», No 4, 2017.
8. FAI «Russian River Register». Rules for the Classification and Construction. Moscow, 2019.
9. Blagoveshchenskij S.N. Spravochnik po statike i dinamike korablya. Statika korablya. Book 1 / S.N. Blagoveshchenskij, A.N. Holodilin. – Leningrad, «Sudostroenie», 1976. – P. 312
10. Sevost'yanov N.B. Ostojchivost' promyslovyh sudov / N.B. Sevost'yanov. – Leningrad, «Sudostroenie». 1970. – P. 200
11. Alfer'ev M.Ya. Teoriya korablya / M.Ya. Alfer'ev. – Moscow, Rechnoj transport, 1959. – P. 291
12. Nogid L.M. Teoriya proektirovaniya sudov / L.M. Nogid. – L.: Sudpromgiz. 1955. – P. 497
13. Ronnov E.P. Raschet harakteristik ostojchivosti gruzovyh sudov vnutrennego plavaniya na rannih stadiyah proektirovaniya / E.P. Ronnov // Trudy GIIVTa, 1985. – No. 211. – P. 151–159.
14. Ronnov E.P. Analiz zapasa ostojchivosti sudna vnutrennego i smeshannogo (reka-more) plavaniya / E.P. Ronnov, Yu.A. Kochnev, I.A. Gulyaev // Zhurnal «Morskie intellektual'nye tekhnologii», No 4, 2020, P. 56-61.

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

Ilya A. Gulyaev, Head of Hull Department, Federal Autonomous Institution Russian River Register, bld. 2, 15, Okružhnoy proezd, Moscow, Russia, 105187

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: ptps@vgavt-nn.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 04.12.2020; опубликована онлайн 23.03.2021.
Received 04.12.2020; published online 23.03.2021

УДК 629.12.

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi66.159>

Диаграмма статической остойчивости судна находящегося в условиях волнения

Ю.А. Кочнев

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

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

Аннотация. При построении диаграммы статической остойчивости судна в соответствии с требованиями Правил классификационных обществ необходим учет особых условий плавания: обледенения, наличия жидких грузов в цистернах и т.п. При этом наличие бортовой качки у судна, вызванной действием волн, учитывается только в момент определения восстанавливающих моментов. В настоящей статье приведён анализ влияния на диаграмму статической остойчивости формы водной поверхности (профиля волны), на которой происходит наклонение. Построение сложной формы объемного водоизмещения, вызванного не только формой судовой поверхности, но и изменением действующей ватерлинии, выполнено с применением твердотельного моделирования теоретического корпуса и объема водного бассейна в среде Autodesk AutoCAD и Visual Lisp. Для тестовых расчётов получено, что возможное отклонение плеча статической остойчивости и площади под положительной частью диаграммы может достигать двенадцати процентов, что необходимо учитывать при проведении проверочных расчётов.

Ключевые слова. Диаграмма статической остойчивости, твердотельная модель судна

Diagrams of static stability of a ship in rough conditions

Yuriy A. Kochnev

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. When constructing a diagram of the static stability of a vessel in accordance with the requirements of the Rules of Classification Societies, it is necessary to take into account special navigation conditions: icing, the presence of liquid cargo in tanks, etc. In this case, the presence of rolling in the ship caused by the action of waves is taken into account only at the moment of determining the restoring moments. This article provides an analysis of the influence on the static stability diagram of the shape of the water surface (wave profile), on which the inclination occurs. The construction of a complex shape of the volumetric displacement, caused not only by the shape of the ship's surface, but also by a change in the current waterline, has been carried out using solid modeling of the theoretical hull and the volume of the water basin in the Autodesk AutoCAD and Visual Lisp environment. For test calculations, it has been found that the possible deviation of the static stability shoulder and the area under the positive part of the diagram can reach twelve percent, which must be taken into account when carrying out verification calculations.

Keywords: Static stability diagram, solid ship model.

Введение

Нормирование остойчивости судов на конечных (больших) углах наклонения осуществляется с применением диаграммы статической остойчивости (ДСО), а её построение осуществляется на «тихой воде», при плоской ватерлинии, наклоняющейся вокруг своего центра тяжести. Реальные условия возникновения у

судна восстанавливающих моментов имеют место на волнении. В [1,2] предлагается методика учета попутной волны на ДСО, но также имеется оговорка, что необходима рекомендация судоводителям избегать подобных курсовых углов. Взаимодействие корпуса судна с трехмерной волной, распространяющейся как в продольном, так и в поперечном относительно судна направлении, может приводить к негативному изменению диаграммы статической остойчивости. Построение диаграммы, учитывающей конечные скорости перемещения волны относительно судна и скорости его качки, является актуальной задачей для повышения безопасности.

Точное положение судна на волнении при действии на него кренящей пары (динамического или статического ветра, иных нагрузок) может быть определено решением уравнений качки в нелинейной постановке [1]. Решение шести уравнений, описывающих нелинейный процесс на случайном волнении, является трудоёмкой задачей, требующей больших затрат машинного времени, к тому же результат во многом зависит от принятых начальных условий.

Морское волнение, являющееся трехмерным случайным процессом, может быть описано различными законами [3, 4] и в общем случае представлено в виде функции двух координатных переменных ξ, η в неподвижной в пространстве системе координат и времени t

$$\zeta_w(\xi_w, \eta_w, t)$$

Положение судна на нерегулярном волнении описывается наиболее полно нелинейной теорией качки [1,6,7], представляющей пространственное положение судна как твердого тела с шестью степенями свободы и времени

$$f_s(\xi, \eta, \zeta, \alpha, \chi, \varphi, t),$$

где ξ, η, ζ – координаты судна в неподвижной в пространстве системе координат;

α, χ, φ – углы рыскания, бортовой и килевой качки судна.

Плечо статической диаграммы остойчивости в наиболее общем виде будет определяться взаимным положением судна и волны, что в настоящей работе рассмотрено в виде квазистатической задачи

$$l = F(\zeta_w, f_s, t)$$

Математическая модель определения плеча статической остойчивости

По определению, плечо статической остойчивости судна или плечо восстанавливающей пары – это перпендикуляр, опущенный из центра тяжести судна на линию действия силы поддержания, положение которой описывается углом наклона судна и действующими координатами центра величины. При традиционном подходе их определение осуществляется через метацентрический радиус, зависящий от момента инерции действующей ватерлинии I_x и объемного водоизмещения V . При нахождении судна на волнении определить момент инерции крайне затруднительно в связи со сложностью аппроксимации ватерлинии двойкой кривизны, вызванной профилем волны, с достаточной степенью точности. Наличие, в дополнение к бортовой, еще вертикальной и килевой качек, приводит к отклонению объёмного водоизмещения от равновесного значения на тихой воде, однако в связи с

конечной скоростью качек можно пренебречь невыполнением уравнения плавучести в бесконечно коротком интервале времени.

Отклонение профиля волны от уровня «тихой» воды в произвольный момент времени приводит при наклонении к дополнительному смещению центра величины как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении. Такая корректировка может вызывать увеличение плеча статической остойчивости, но, что более опасно, и его уменьшение (рисунок 1)

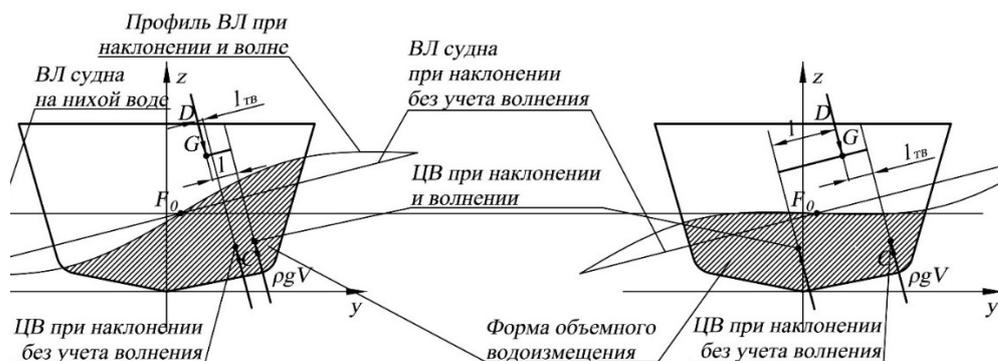
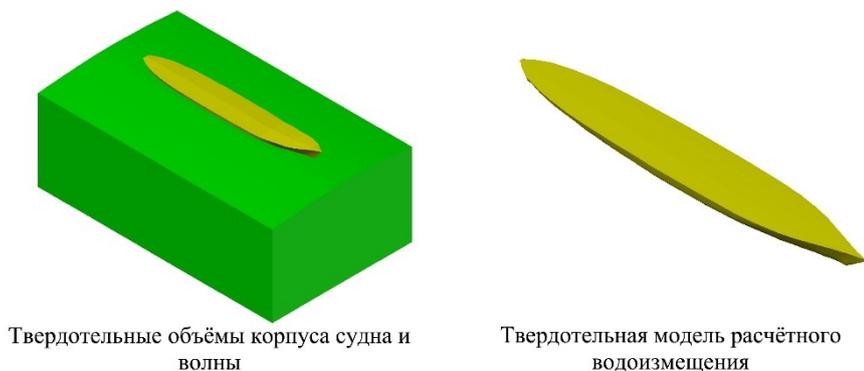


Рис. 1. Наклонение судна на волне

Определение фактического объемного водоизмещения, координат центра величины, площади и координат центра тяжести ватерлинии в данном случае возможно с применением твердотельного моделирования корпуса судна и участка водной среды, что нами было реализовано в системе AutoCAD, используя дополнительные его возможности по алгоритмизации в среде AutoLisp [8,9] (рисунок 2).



Твердотельные объемы корпуса судна и волны

Твердотельная модель расчётного водоизмещения

Рис. 2. Моделирование объемного водоизмещения

Результаты определения плеча статической остойчивости без учета формы и движения волны были сопоставлены с аналогичными величинами по программе SeaHydro, имеющей признание Российского Речного Регистра (рисунок 3). Расхождение в сопоставительных расчётах наблюдается на нисходящей ветви кривой ДСО, которое в относительных значениях составляет не более 5%, а до угла, соответствующего максимуму диаграммы, кривые визуально совпадают и имеют погрешность менее 0,2%. Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности использования предложенного метода твердотельного моделирования для построения ДСО, в том числе и с учётом волнения.

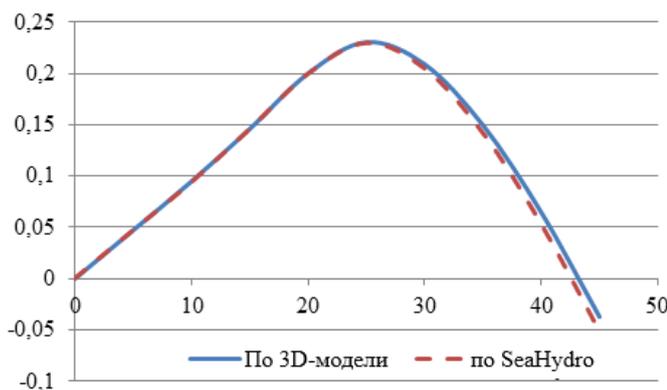


Рис. 3. Сопоставление результатов расчёта ДСО

Плечо статической остойчивости при наклонении судна, расположенного лагом к неподвижной волне, приведено на рисунке 4. Характеристики статической волны выбраны соответствующими разряду «О»: высота – 2,0 м, длина 50м [10]. Максимальная погрешность отмечается на вершине волны и при угле, равном максимуму ДСО, составляет порядка 10%. Положение судна на подошве волны, практически не ухудшает плечи остойчивости.

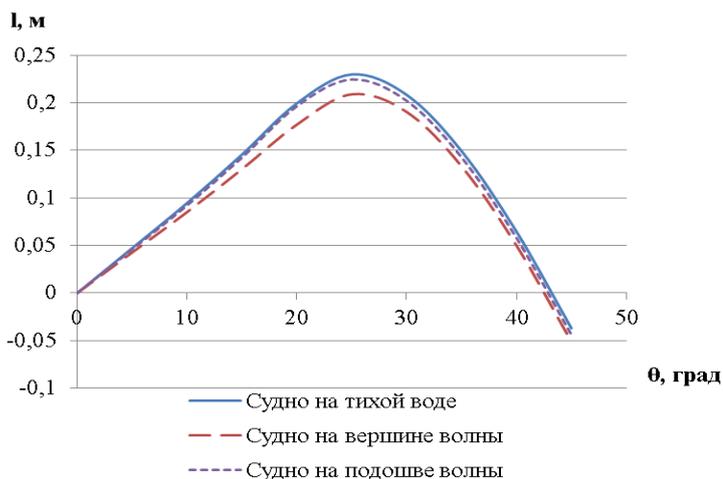


Рис. 4. Сопоставление результатов расчёта ДСО

Рассматривая определение плеча статической остойчивости как частный случай имитационной задачи, при начальных условиях в системе координат жёстко связанной с судном (α_0 – курсовой угол судна по отношению к волне, y_{w0} – положение вершины волны в начальный момент времени, v_w – скорость перемещения волны, θ_0 – начальный угол крена судна, ω – угловая скорость качки судна), наклонение на некоторый угол θ приводит к смещению в горизонтальном направлении профиля волны на величину

$$\Delta y_w = \frac{\theta}{\omega} \times v_w,$$

что, в свою очередь, дополнительно смещает точку действия силы поддержания и изменяет плечо восстанавливающей пары (рисунок 5).

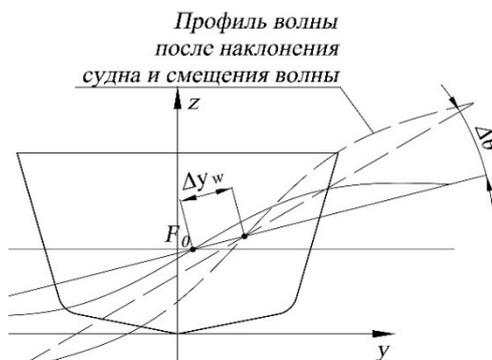


Рис. 5. Смещение профиля волны при наклонении судна

Действующие нормы Российского Речного Регистра регламентируют проверку остойчивости судов класса «О» и выше при плавании на волнении и имеют в своем составе методику определения характеристик качки (амплитуды (начального положение) и периода) [11]. Скорость движения волны, как её высота и длина, являются случайными процессами, однако рассматривая фиксированный начальный и конечный момент времени, они могут быть приняты постоянными [1]. Построив для рассматриваемых условий ДСО (рисунок 6) можно определить, что погрешность максимального плеча составляет порядка 12% и возникает у судна, наклоняющегося против движения волны.

Правила [11, 12] также предъявляют требования к площади под положительной частью диаграммы до различных углов, а она, в свою очередь, характеризует остойчивость судна на динамических наклонениях. Приращение площадей для наихудшей из рассматриваемых диаграмм, составляет так же, как и для самого плеча около 12%.

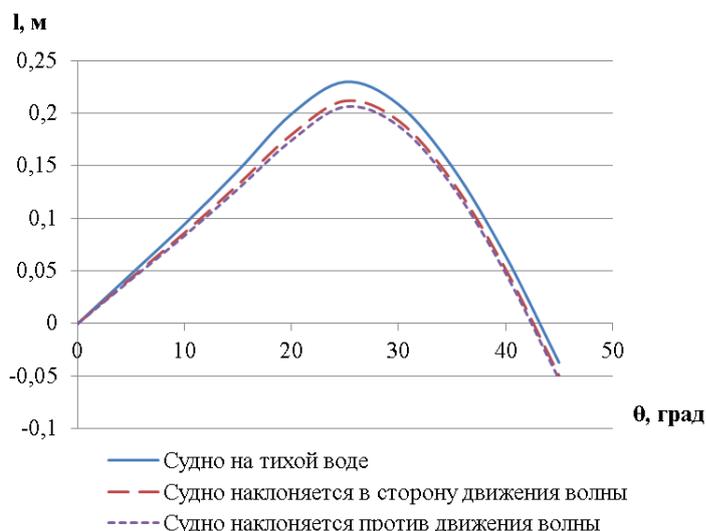


Рис. 6. ДСО на перемещающейся волне

Заключение

Отклонение значений плеч статической остойчивости при построении ДСО в настоящий момент не учитывается Правилами Регистра, что может привести к аварийным ситуациям. Рассмотренные частные случаи наклона, на наш взгляд, наиболее опасные с точки зрения взаимного положения судна и волны, дают наглядное представление об уровне снижения запаса остойчивости.

Задачу построения диаграмм, учитывающую худшее взаимное положение судна и волны, можно сформулировать как оптимизационную, решение которой позволит иметь ДСО, соответствующую худшему случаю эксплуатации,

$$l(X, Z, \theta) \rightarrow \min$$

где X – известные элементы и характеристики системы судно-волна;

Z – оптимизируемые параметры, такие, как длина и высота волны, начальное положение рассматриваемой системы;

θ – угол крена.

Для речного судна, обладающего, как правило, избыточной остойчивостью, полученное снижение плеча при принятых характеристиках волнения не является критичным, однако при совместном действии более опасных характеристик волнения и ряда факторов, таких, как отклонения в аппликате центра тяжести и центра парусности, неучёт влияния жидких грузов в «малых» цистернах, ошибки судоводителя и других, может существенно повлиять на безопасность судна.

Литература

1. Справочник по теории корабля: в трех томах. Том 2. Статика корабля. Качка судов / под ред. Я.И. Войткунского. – Л. Судостроение, 1985. – 440с.
2. Благовещенский С.Н., Холодильник А.Н. Справочник по статике и динамике корабля. В двух томах. Изд. 2-е, перераб. и доп. Том 1. Статика корабля. – Л. Судостроение, 1976. – 336 с.
3. Longuet-Higgins Michael S. The statistical analysis of a random, moving surface // Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1957 T. 249, № 966 C. 321–387.
4. Динамика океана. Учебник / под ред. Ю.П. Доронина. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 304 с.
5. Ремез Ю.В. Теория качки. Л.: Судостроение, 1980. – 328 с.
6. Pawlowski, J.. A nonlinear theory of ship motion in waves. 2010
7. Nonlinear Ship Motions and Wave-Induced Loads by a Rankine Method / D.Kring, Y.-F.Huang, P.Sclavounos, T.Vada, A.Braathen // Twenty-First Symposium on Naval Hydrodynamics, 1997 – p. 45-62
8. Полищук Н.Н., Лоскутов П.В., AutoLisp и VisualLisp в среде AutoCad. – СПб. БХВ Петербург, 2006 – 906с.
9. Кочнев Ю.А. Расширение возможностей AutoCad для применения на начальных этапах проектирования // Труды 14-го международного научно-промышленного форума «Великие реки – 2012». Материалы научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов, специалистов и студентов «Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек». Том 1.– Н. Новгород: Изд-во ФБОУ ВПО «ВГАВТ» – 2012 – с. 291-293
10. Учебный справочник по прочности судов внутреннего плавания / Давыдов В.В., Маттес Н.В., Сиверцев И.Н. изд. 2-ое, перераб. и доп. М.: Речной транспорт, 1958 – 755 с.
11. ФАУ «Российский Речной Регистр». Правила классификации и постройки судов. Москва, 2019 г.
12. ФАУ «Российский морской регистр судоходства». Правила классификации и постройки морских судов. Санкт-Петербург, 2020 г.

References

1. Spravochnik po teorii korablya: v trekh tomah. Tom 2. Statika korablya. Kachka sudov. pod red. YA.I. Vojtkunskogo. – L. Sudostroenie, 1985. – 440s.
2. Blagoveshchenskij S.N., Holodilin A.N. Spravochnik po statike i dinamike korablya. V dvuh tomah. Izd. 2-e, pererab. i dop. Tom 1. Statika korablya. – L. Sudostroenie, 1976. – 336 s.
3. Longuet-Higgins Michael S. The statistical analysis of a random, moving surface. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1957 T. 249, № 966 S. 321–387.
4. Dinamika okeana. Uchebnik. pod red. YU.P. Doronina. – L.: Gidrometeoizdat, 1980. – 304 s.
5. Remez YU.V. Teoriya kachki. L.: Sudostroenie, 1980. – 328 s.
6. Pawlowski, J.. A nonlinear theory of ship motion in waves. 2010
7. Nonlinear Ship Motions and Wave-Induced Loads by a Rankine Method / D.Kring, Y.-F.Huang, P.Sclavounos, T.Vada, A.Braathen. Twenty-First Symposium on Naval Hydrodynamics, 1997 – p. 45-62
8. Polishchuk N.N., Loskutov P.V., AutoLisp i VisualLisp v srede AutoCad. – SPb. BHV Peterburg, 2006 – 906s.
9. Kochnev YU.A. Rasshirenie vozmozhnostej AutoCad dlya primeneniya na nachal'nyh etapah proektirovaniya. Trudy 14-go mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma «Velikie reki – 2012». Materialy nauchno-metodicheskoy konferencii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, aspirantov, specialistov i studentov «Problemy ispol'zovaniya i innovacionnogo razvitiya vnutrennih vodnyh putej v bassejnah velikih rek». Tom 1.– N. Novgorod: Izd-vo FBOU VPO «VGAVT» – 2012 – s. 291-293
10. Davydov V.V., Mattes N.V., Sivercev I.N. Uchebnyj spravochnik po prochnosti sudov vnutrennego plavaniya. izd. 2-oe, pererab. i dop. M.: Rechnoj transport, 1958 – 755 s.
11. FAU «Rossijskij Rechnoj Registr». Pravila klassifikacii i postrojki sudov. Moskva, 2019 g.
12. FAU «Rossijskij morskoy registr sudohodstva». Pravila klassifikacii i postrojki morskikh sudov. Sankt-Peterburg, 2020.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Юрий Александрович Кочнев, к.т.н., доцент, доцент кафедры проектирования и технологии постройки судов Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kaf_ptps@vsuwt.ru

Yuri A. Kochnev, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of ship design and construction technology, Federal State-Financed Educational Institution of Higher Education Volga State University of Water Transport (VSUWT), 5, Nesterova street, Nizhny Novgorod, Russia, 603951

Статья поступила в редакцию 02.12.2020; опубликована онлайн 23.03.2021.
Received 02.12.2020; published online 23.03.2021.

УДК 629.565.2:539.4

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi66.145>

Расчетные модели прочности плавучих доков на основе метода конечных элементов

А.А. Миронов¹

Д.Ю. Титко¹

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

Аннотация. Рассмотрены особенности моделирования общей прочности плавучих доков с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Выполнен сравнительный анализ балочных и трехмерных моделей с учетом взаимодействия дока с судном. Для решения проблемы снижения трудоемкости создания и размера конечно-элементной модели предложено использовать элементы объемного ортотропного тела для моделирования главных поперечных связей понтона. Гидростатическое упругое основание дока моделируется элементами пружин. Модель докового опорного устройства включает элементы пружин и зазора. Судно рассматривается в рамках модели эквивалентного бруса. Получены результаты о таких эффектах, как перераспределение сил поддержания из-за деформации дока, неполное включение башен в общий продольный изгиб дока, влияние жесткости судна не только на продольный, но и на поперечный изгиб дока.

Ключевые слова: общая продольная прочность, общая поперечная прочность, система док - судно, доковое опорное устройство, конечно-элементная модель.

Design models of strength of floating docks based on the finite element method

Anatoliy A. Mironov¹

Dmitriy Y. Titko¹

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

Abstract. The features of modeling the total strength of floating docks using the finite element method (FEM) are considered. Comparative analysis of beam and three-dimensional models has been carried out taking into account the interaction of the dock with the ship. To solve the problem of reducing the complexity and size of the finite element model, it is proposed to use the elements of a three-dimensional orthotropic body to model the main cross-links of the pontoon. The hydrostatic elastic base of the dock is modeled by spring elements. The dock support model includes spring and clearance elements. The vessel is considered within the framework of the equivalent bar model. Results have been obtained on such effects as the redistribution of support forces due to deformation of the dock, incomplete inclusion of towers in the general buckling of the dock, the effect of the rigidity of the vessel not only on the longitudinal, but also on the transverse bending of the dock.

Keywords: total longitudinal strength, total shear strength, dock - ship system, dock support device, finite element model.

Введение

Судоподъем с использованием плавучих доков является сложной технологической операцией, требующей комплексного решения проблем плавучести, устойчивости и прочности. Анализ опыта эксплуатации доков показывает, что аварии, вызванные нарушением, прежде всего, их общей прочности приводят к тяжелым последствиям, связанным с большими экономическими потерями, в связи с чем совершенствование моделей и методов расчета прочности доков остается актуальным [1] - [3].

Наиболее простая расчетная модель общей продольной и поперечной прочности дока положена в основу требований Российских морского и речного регистров судоходства. В рамках данных требований используется модель эквивалентного бруса и эффекты взаимодействия дока с судном не рассматриваются.

Основные положения модели общей продольной прочности дока с учетом его взаимодействия с судном через доковое опорное устройство (ДОУ) разработаны выдающимися советскими учеными-кораблестроителями, среди которых следует отметить Курдюмова А.А., Козлякова В.В., Диковича Л.В., Архангородского А.Г. и др. Обзор работ в данном направлении представлен в монографиях [4], [5]. В рамках предложенного подхода система док – ДОУ – судно приводится к расчетной модели балки на упругом основании и изгибающие моменты для дока и судна в первом приближении пропорциональны их жесткости:

$$M_{\text{д}} = \frac{I_{\text{д}}}{I_{\text{д}} + I_{\text{с}}} M_0 - \Delta M, \quad M_{\text{с}} = \frac{I_{\text{с}}}{I_{\text{д}} + I_{\text{с}}} M_0 + \Delta M, \quad (1)$$

где $M_{\text{д}}$, $M_{\text{с}}$ - изгибающие моменты в сечении дока и судна;

$I_{\text{д}}$, $I_{\text{с}}$ - моменты инерции сечений дока и судна;

M_0 - изгибающий момент при рассмотрении судна в качестве нагрузки для дока;

ΔM - дополнительный изгибающий момент, определяющий перераспределение нагрузки, связанное с упругой податливостью системы док – ДОУ - судно.

Эффективным методом решения задачи об упругом взаимодействии дока с судном через ДОУ, как это было показано в [5], является метод конечных элементов (МКЭ). В рамках концепции эквивалентного бруса использовались балочные элементы для дока и судна, стержневые элементы для ДОУ, гидростатическое упругое основание учитывалось в элементах дока.

Естественным развитием расчетной схемы дока является переход к трехмерным моделям. Одним из вариантов такого развития служит использование трехмерных балочных элементов [6]. В рамках таких моделей не учитывается сложное напряженное состояние обшивки, настилов, переборок, что привело в настоящее время к использованию элементов пластин и оболочек.

В целом ряде работ, как правило, зарубежных авторов, трехмерное моделирование конструкции дока сочетается с рассмотрением судна в качестве нагрузки без учета его работы в составе системы док – ДОУ – судно. В этом случае, как правило, решаются специальные вопросы, такие как: действие волновых нагрузок [7], [8], анализ различных вариантов загрузки [9], особенности работы передаточных доков [10]. Альтернативным вариантом является использование трехмерных моделей для судна при заданных опорных реакциях ДОУ [11].

Трехмерное моделирование конструкции дока с учетом его упругого взаимодействия с судном выполнено в работах [2],[12], где для судна в рамках концепции эквивалентного бруса использована модель в виде коробчатой балки.

Особенностью всех вышеперечисленных работ является использование для описания сил поддержания заданной нагрузки в виде гидростатического давления,

что помимо определенных сложностей при задании граничных условий, требует предварительной удифферентовки дока и не позволяет учесть перераспределение сил поддержания, связанное с общей деформацией дока.

Проблемы трехмерного моделирования системы док – ДОУ – судно рассмотрены в работах [13], [14], где указывается на большую трудоемкость создания моделей и необходимость использования процедуры редуцирования для снижения размера разрешающей системы уравнений МКЭ. Снизить размер результирующей системы уравнений равновесия позволяет использование метода суперэлементов, обзор по которому представлен в [15], а также метода модуль-элементов [16]. Ограничение на использование данных методов связано с нелинейностью деформирования отдельных связей корпуса.

Практика судоподъема показывает на необходимость создания компактных расчетных моделей, позволяющих проводить оперативный анализ вариантов докования судов [2], [17], возможность учета эксплуатационных повреждений конструкций дока, прежде всего коррозионного износа и остаточных деформаций связей [6]. Проблема создания расчетных моделей, не требующих больших вычислительных ресурсов, связана с разработкой автоматизированных систем управления доковыми операциями [14].

Расчетные модели

Одно из направлений решения проблемы создания оперативных расчетных моделей системы док – ДОУ – судно может быть связано с учетом особенностей работы отдельных конструкций в составе корпуса и использования для них различных критериев прочности. Прежде всего, это касается разделения задач общей и местной прочности, последние из которых решаются с использованием простых расчетных схем. Общая прочность дока нормируется по суммарным напряжениям от общего изгиба дока и понтона, определяемым в рамках эквивалентного сечения без учета локальной концентрации напряжений.

Апробированным подходом для построения модели общей продольной прочности является использование элементов оболочки для описания обшивки, настилов, продольных переборок, главных продольных связей понтона, толщины которых определяются с учетом площади поперечных сечений продольного набора. Общее число конечных элементов такой модели оказывается небольшим.

Более сложной задачей является построение компактной модели общей поперечной прочности понтона, для обеспечения которой, как правило, используется поперечная система набора и большое число главных поперечных связей. Учет поперечного набора включением площади сечений балок в толщину настила и обшивки приводит к необходимости использования ортотропных элементов оболочки, используемых одновременно и для моделирования общей продольной прочности понтона. В качестве альтернативного подхода для моделирования большого числа главных поперечных связей предлагается использовать переход от дискретной к континуальной модели объемной ортотропной среды, удовлетворяющей соотношению между модулями продольной упругости и коэффициентами Пуассона в ортогональных направлениях в виде $E_i \nu_{ij} = E_j \nu_{ji}$, ($i, j = 1 \dots 3$). Принимая для

осей x_1 продольное, x_2 поперечное и x_3 вертикальное направления получим $E_1 = 0$, $E_2 = Es/b$, $E_3 = E_2$, $\nu_{12} = \nu_{21} = \nu_{13} = \nu_{31} = 0$, $\nu_{23} = \nu_{32} = \nu$, где E и ν - модуль продольной упругости и коэффициент Пуассона стали корпуса, s и b - толщина и шпация главных поперечных связей понтона. После получения из решения

системы уравнения равновесия перемещений узлов конечно-элементной модели вычисление напряжений выполняется со значением модулей $E_2 = E_3 = E$.

Упругое взаимодействие дока с судном через ДОО моделируется элементами пружин, которые при необходимости введения начальных зазоров могут быть дополнены элементами зазора (gap).

Граничные условия для дока могут формулироваться в различных вариантах. Наиболее часто используется смешанный вариант, в рамках которого силовая часть задается в виде гидростатического давления. Такой подход не в полной мере отражает физическую сторону задачи, а именно - наличие гидростатического упругого основания, приводящего к перераспределению сил поддержания в процессе деформирования дока. Упругое основание может моделироваться в двух вариантах. В наиболее строгой постановке необходимо использовать в подводной части дока элементы оболочки, матрицы жесткости которых построены с учетом энергии деформации основания, как это было сделано для элементов балочной модели в работе [5]. Во втором варианте упругое основание может моделироваться элементами пружин, что приводит к зависимости решения от степени дискретизации основания. Последнее в свою очередь определяется соотношением жесткостей основания и конструкции, которое в рамках балочной модели характеризуется безразмерным параметром:

$$u = l^4 \sqrt{\frac{k}{4EI}}$$

где k - жесткость упругого основания;
 l, I - длина и момент инерции балки.

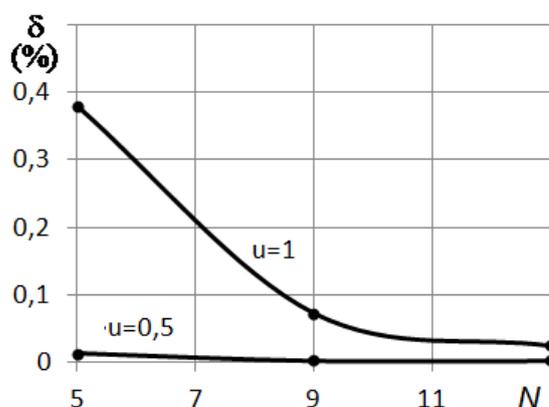


Рис. 1 Зависимость ошибки вычисления максимального изгибающего момента от числа пружин, моделирующих упругое основание балки

На рис. 1 представлена зависимость ошибки δ вычисления максимального изгибающего момента в балке, нагруженной сосредоточенной силой, в зависимости от числа пружин N , моделирующих упругое основание в диапазоне значений параметра u , характерном для главных поперечных связей понтонов металлических доков. Анализ результатов показывает, что главные поперечные связи понтонов являются жесткими по отношению к гидростатическому основанию, которое в этом случае может моделироваться малым числом пружин.

При решении проблемы прочности дока докуемые суда естественно моделировать в рамках концепции эквивалентного бруса балочными элементами. На рис. 2

представлена 3D модель ¼ части системы док-ДОУ-судно, построенная с учетом высказанных предложений. Дискретизация модели соответствует варианту, при котором увеличение числа элементов в 2 раза привело к изменению максимальных напряжений, не превышающем 10%.

В модели приняты следующие основные параметры: для дока $L_d \times B_d \times H_d = 275 \times 63,3 \times 22,65$ м, $I_d = 283$ м⁴;

для судна $L_c = 220$ м, $I_c = 400$ м⁴, $G_c = 40000$ т.

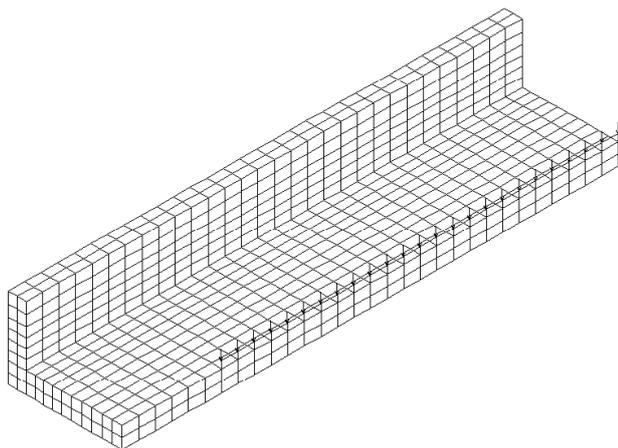


Рис. 2 Конечно-элементная 3D модель ¼ части системы док-ДОУ-судно

Результаты

Использование трехмерной модели дока позволяет выявить ряд особенностей работы его конструкции и выполнить сравнительный анализ различных расчетных схем. В таблице 1 представлены результаты расчетов напряжений от общего продольного изгиба, действующих в миделевом сечении в настиле топ-палубы и обшивке днища понтона, полученные по различным расчетным моделям. Расчетная схема Регистра судоходства не учитывает жесткость судна и изменение сил поддержания, связанное с деформацией дока. В рамках МКЭ использованы предложенная модель (рис. 2) и балочная модель, построенные в вариантах с учетом и без учета жесткости судна и его взаимодействия через ДОУ с доком и включающие гидростатическое упругое основание.

Таблица 1

Напряжения общего продольного изгиба при использовании различных расчетных моделей

Расчетная модель	Без учета жесткости судна		С учетом жесткости судна		Отношение напряжений
	Напряжения в палубе (МПа)	Напряжения в днище (МПа)	Напряжения в палубе (МПа)	Напряжения в днище (МПа)	
Регистр судоходства	149,8	66,4	-	-	-
Балочная	131,3	58,2	58,1	25,8	0,442
Трехмерная	119,7	61,7	54,5	34,2	0,455

Анализ результатов, представленных в табл. 1, позволяет выявить ряд эффектов, связанных с деформированием дока. Проявляются существенное влияние перераспределения сил поддержания из-за деформации дока и неполное вовлечение башен в общий продольный изгиб, приводящий к более низким по сравнению с балочной моделью напряжениям в топ палубе и соответственно к более высоким в обшивке днища понтона. Учет жесткости судна приводит к снижению действующих напряжений, отношение которых к напряжениям, определенным без такого учета приведены в последнем столбце табл. 1. В первом приближении данное отношение, как это следует из зависимостей (1), пропорционально отношению $I_D / (I_D + I_C)$, которое в нашем случае равно значению 0,414. Эффект отклонения распределения суммарного изгибающего момента между доком и судном от прямо пропорционального отношению I_D / I_C связан с дополнительным моментом ΔM , который в свою очередь зависит от погонного значения приведенного коэффициента жесткости ДОУ k , в составе которого может быть учтена и жесткость днищевых перекрытий судна. На рис. 3 представлена зависимость влияния коэффициента k на отношение действительного изгибающего момента на миделе дока M_D , полученного на основе балочной модели, к его значению \tilde{M}_D , вычисленному по зависимости (1) без учета ΔM , из которого следует, что с увеличением значения k распределение суммарного изгибающего момента между доком и судном стремится к отношению I_D / I_C .

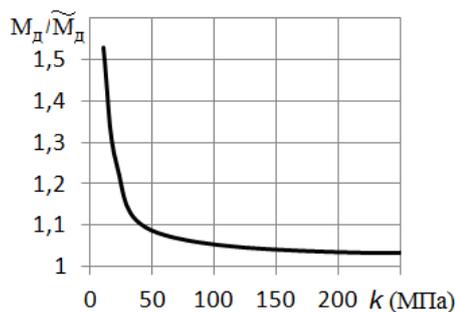


Рис. 3. Отношение изгибающего момента на миделе дока к его значению в первом приближении в зависимости от коэффициента жесткости ДОУ

Неполное вовлечение башен в общий продольный изгиб дока зависит от отношения его размерений L_D / B_D . На рис. 4 в зависимости от L_D / B_D представлены отношения максимальных напряжений в топ палубе и обшивке днища понтона, вычисленных по 3D модели, к значениям, полученным с использованием балочной модели. Представленные результаты характеризуют отклонение расчетной модели дока от модели эквивалентного бруса, которое может зависеть не только от отношения L_D / B_D , но и от отношения L_D / L_C .

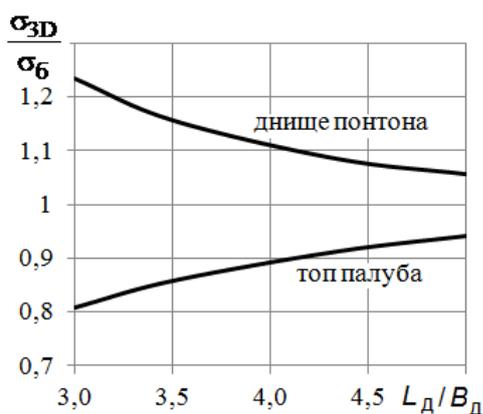


Рис. 4. Отношение напряжений, полученных по 3D модели и модели балки, в зависимости от отношения размеров дока

Влияние на изгибающие моменты эффекта перераспределения сил поддержания из-за деформации дока демонстрирует рис. 5, где представлено отношение максимальных моментов, полученных по модели балки на упругом основании и модели Регистра, в зависимости от отношения варьируемого момента инерции сечения дока к его значению, принятому в базовом примере.

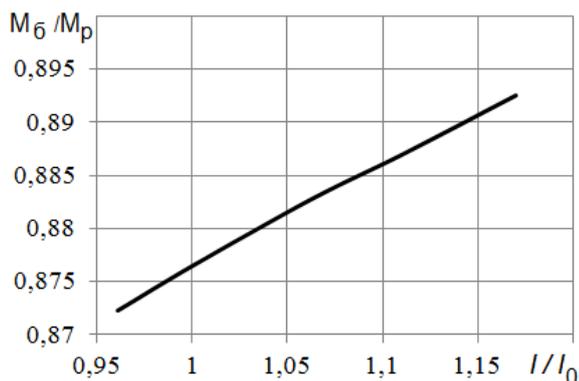


Рис. 5 Отношения значений изгибающего момента, вычисленных с учетом и без учета перераспределения сил поддержания, в зависимости от варьирования момента инерции сечения дока

Выполнение расчетов поперечной прочности понтона с использованием различных моделей позволило выявить влияние на их результаты учета жесткости доуемого судна. На рис. 6 в зависимости от L_6/B_6 приведены значения коэффициента снижения напряжений в главных поперечных связях понтона k_σ , равного отношению максимальных напряжений, вычисленных с учетом и без учета жесткости судна. Полученные результаты показывают, что учет жесткости судна приводит к снижению не только напряжений от общего продольного изгиба дока, но и напряжений общего поперечного изгиба понтона, хотя эффект проявляется в существенно меньшей степени.

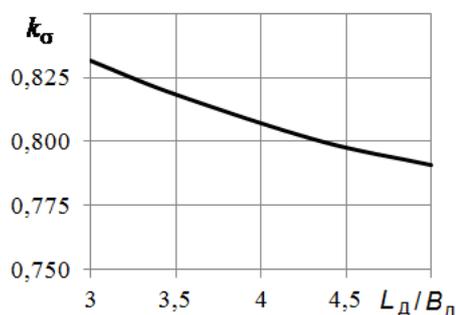


Рис. 6 Коэффициент отношения напряжений в главных поперечных связях понтона, полученных с учетом и без учета жесткости докуемого судна, в зависимости от отношения размерений дока

Заключение

Результаты выполненного исследования показывают возможность построения эффективных компактных расчетных 3D-моделей плавучих доков для оперативного анализа их общей продольной и поперечной прочности. Особенностью таких моделей является использование элементов ортотропных пластин для описания обшивки и настилов, подкрепленных ребрами жесткости, объемных элементов ортотропной среды для моделирования главных поперечных связей понтона, элементов пружин для описания гидроупругого основания, что исключает дополнительную операцию удифферентовки дока, а также введение в расчетную схему моделей докуемого судна и ДОУ.

Анализ полученных результатов показывает, что по сравнению с расчетной схемой Регистра имеются дополнительные запасы как продольной, так и поперечной прочности, связанные с учетом жесткости докуемого судна и перераспределением сил поддержания из-за деформации дока. В тоже время показано, что имеется эффект неполного вовлечения башен в общий продольный изгиб дока, что снижает его прочность.

В рамках рассмотренной модели дока дополнительно может быть выполнен анализ скручивания его корпуса и учет влияния начального зазора в системе ДОУ.

Литература

1. Смирнов А.Г. Анализ причин аварий плавучих доков / А.Г. Смирнов // Судостроение. – 2001. – № 3. – С. 45–47.
2. Антоненко С.В. Обеспечение эксплуатационной надёжности плавучих доков / С.В. Антоненко, Е.В. Линник, Н.Ю. Голобокова, Ю.Г. Рыбалкин // Морские интеллектуальные технологии. – 2013. – Спецвыпуск № 2. – С.4–8.
3. Кулеш В. А. Проблемы и пути решения вопросов оценки технического состояния плавучих доков / В.А. Кулеш, Ю.Ф. Литвинов // Исследования по вопросам повышения эффективности судостроения и судоремонта. – Владивосток: ДВГТУ, 1993. – С. 71–79.
4. Металлические плавучие доки / М.А. Ловягин, В.М. Корсаков, Я.Б. Каганер и др. Под общ. ред. М. А. Ловягина. – Л.: Судостроение, 1964. 336 с.
5. Козляков В. В. Проектирование доковых опорных устройств / В.В. Козляков, Г.Н. Финкель, И.Я. Хархурим. – Л.: Судостроение, 1973. 176 с.
6. Кулеш В.А. Разработка норм износа для плавучего дока с учетом эксплуатационных ограничений / В.А. Кулеш, Д.В. Немкин // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2016. – № 3 (37) – С. 128–136.
7. Burlacu E. Strength investigation of a small size floating dock unit by 3D-FEM models in head design waves / E. Burlacu, L. Domnisoru // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 400 (2018). – Article 082006. <https://doi:10.1088/1757-899X/400/8/082006>.

8. Burlacu E. On the global strength analysis of preliminary design for several floating dock types / E. Burlacu, L. Domnisoru // *Mechanical Testing and Diagnosis*. – 2019. – Vol. 1. – Pp. 5–16. <https://doi.org/10.35219/mtd.2019.1.01>.
9. Structural Safety Assessment of a Floating Dock during Docking Operation / M. El-Maadawy, M. M. Moustafa, H. S. El-Kilani and Adel A. Tawfeek // *Port-said engineering research journal*. – 2018. – Vol. 22. – №. 2. – Pp. 32–39.
10. Study on simulation experiment of the force of floating dock during off-loading based on ANSYS / Guan Guan, Xiaole Yang, Qu Yang, Changwei Peng // *Proceedings of the 2018 International Conference on Mathematics, Modelling, Simulation and Algorithms (MMSA 2018)*. – 2018. – Vol. 159. – Pp. 69–73. <https://doi.org/10.2991/mmsa-18.2018.16>.
11. Cheol-Ho Ryu Parametric study for assessment of reaction forces on ship docking supports / Cheol-Ho Ryu, Sung-Chan Kim, Jang-Hyun Lee // *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*. – 2013. – Vol. 19. – №. 3. – Pp. 290-301. <http://dx.doi.org/10.7837/kosomes.2013.19.3.290>
12. Линник Е. В. Расчет трехсекционного плавучего дока как пространственной пластинчатой конструкции / Е.В. Линник, С.В. Антоненко // *Судостроение*. – 2011. - № 1. – С. 52 – 56.
13. Сутырин В.И. Проектирование доковых опорных устройств с применением методов конденсации / В.И. Сутырин // *Судостроение*. – 1989. – № 10. – С. 40–44.
14. Сутырин В.И. Концепция подсистемы инженерного анализа для информационной системы управления доковыми операциями / В.И. Сутырин // *Известия КГТУ*. – 2019. – № 52. – С. 169–176.
15. Метод суперэлементов в расчетах инженерных сооружений / В.А. Постнов, С.А. Дмитриев, Б.К. Елтышев, А.А. Родионов. – Л.: Судостроение, 1979. 287 с.
16. Постнов В.А. Метод модуль-элементов в расчетах судовых конструкций / В.А. Постнов, Н.А. Тарануха. – Л.: Судостроение, 1990. 320 с.
17. Антоненко С.В. Некоторые проблемы докования крупных кораблей в плавучих доках и опыт их решения / С.В. Антоненко // *Вестник инженерной школы ДВФУ*. – 2015. - № 4 (25). – С. 148 – 160.

References

1. Smirnov A.G. “Analiz prichin avarij plavuchih dokov” *Sudostroenie* 3 (2001): 45–47.
2. Antonenko S.V., Linnik E.V., Golobokova N.Ju., Rybalkin Ju.G. “Obespechenie jekspluatacionnoj nadjozhnosti plavuchih dokov” *Morskie intellektual'nye tehnologii* 2 *Specvypusk* (2013): 4–8.
3. Kulesh V.A., Litvinov Ju.F. “Problemy i puti reshenija voprosov ocenki tehničeskogo sostojanija plavuchih dokov” *Issledovanija po voprosam povyshenija jeffektivnosti sudostroenija i sudoremonta. Vladivostok: DVGTU*, 1993: 71–79.
4. Lovjagin M.A., Korsakov V.M., Kaganer Ja.B. i dr. *Pod obshh. red. Lovjagina M. A. Metallicheskie plavuchie doki*. L.: Sudostroenie, 1964.
5. Kozljakov V.V., Finkel' G.N., Harhurim I.Ja. *Proektirovanie dokovyh opornyh ustrojstv*. L.: Sudostroenie, 1973.
6. Kulesh V.A., Nemkin D.V., “Razrabotka norm iznosa dlja plavuchego doka s uchetom jekspluatacionnyh ogranichenij” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova* 3 (2016): 128–136.
7. Burlacu E., Domnisoru L. “Strength investigation of a small size floating dock unit by 3D-FEM models in head design waves” *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 400 (2018), Article 082006. <https://doi:10.1088/1757-899X/400/8/082006>.
8. Burlacu E., Domnisoru L. “On the global strength analysis of preliminary design for several floating dock types” *Mechanical Testing and Diagnosis* 1 (2019): 5–16. <https://doi.org/10.35219/mtd.2019.1.01>.
9. El-Maadawy M., Moustafa M. M., El-Kilani H. S., Adel A. “Tawfeek Structural Safety Assessment of a Floating Dock during Docking Operation” *Port-said engineering research journal* 22.2 (2018): 32–39.
10. Guan Guan, Xiaole Yang, Qu Yang, Changwei Peng “Study on simulation experiment of the force of floating dock during off-loading based on ANSYS” *Proceedings of the 2018*

- International Conference on Mathematics, Modelling, Simulation and Algorithms (MMSA 2018) 159 (2018): 69–73. <https://doi.org/10.2991/mmsa-18.2018.16>.
11. Cheol-Ho Ryu, Sung-Chan Kim, Jang-Hyun Lee “Parametric study for assessment of reaction forces on ship docking supports” *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety* 19.3 (2013): 290-301. <http://dx.doi.org/10.7837/kosomes.2013.19.3.290>
 12. Linnik E. V., Antonenko S.V. “Raschet trehsekcionnogo plavuchego doka kak prostranstvennoj plastinchatoj konstrukcii” *Sudostroenie* 1 (2011): 52 – 56.
 13. Sutyurin V.I. “Proektirovanie dokovyh opornyh ustrojstv s primeneniem metodov kondensacii” *Sudostroenie* 10 (1989): 40–44.
 14. Sutyurin V.I. “Konceptija podsistemy inzhenerenogo analiza dlja informacionnoj sistemy upravlenija dokovymi operacijami” *Izvestija KGTU* 52 (2019): 169–176.
 15. Postnov V.A., Dmitriev S.A., Eltyshhev B.K., Rodionov A.A. *Metod superjelementov v raschetah inzhenernyhsooruzhenij*. L.: Sudostroenie, 1979.
 16. Postnov V.A., Taranuha N.A. *Metod modul'-jelementov v raschetah sudovyh konstrukcij*. L.: Sudostroenie, 1990.
 17. Antonenko S.V. “Nekotorye problemy dokovaniya krupnyh korablej v plavuchih dokah i opyt ih reshenija” *Vestnik inzhenernoj shkoly DVFU* 4 (2015): 148 – 160.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Миронов Анатолий Алексеевич, д.т.н., доцент, профессор кафедры аэро-гидродинамики, прочности машин и сопротивления материалов, Нижегородский технический университет им. Р.Е. Алексеева» (ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева») 603950, г. Н. Новгород, ул. Минина, д. 24, e-mail: miran56@mail.ru

Anatoliy A. Mironov Dr. Sc., Associate Professor, Professor at the Department of Aero hydrodynamics machine strength and strength of materials, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 24 Minina st, Nizhny Novgorod, 603950

Титко Дмитрий Юрьевич, магистр, инженер кафедры аэро-гидродинамики, прочности машин и сопротивления материалов, Нижегородский технический университет им. Р.Е. Алексеева» (ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева») 603950, г. Н. Новгород, ул. Минина, д. 24, e-mail: dima-tiko@yandex.ru

Dmitriy Y. Titko, Master, Engineer at the Department of Aero hydrodynamics machine strength and strength of materials, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 24 Minina st, Nizhny Novgorod, 603950

Статья поступила в редакцию 27.12.2020; опубликована онлайн 23.03.2021.
Received 27.12.2020; published online 23.03.2021.

УДК 629.5.083.5(470.21)

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi66.154>

Повышение эффективности ремонта судов путем совершенствования технической подготовки судоремонтного производства

Т.Ю. Пашеева¹

Д.А. Пономаренко²

¹*Мурманский государственный технический университет, г. Мурманск, Россия*

²*Филиал «35 СРЗ» АО «ЦС «Звездочка», г. Мурманск, Россия*

Аннотация: В статье рассмотрены актуальные вопросы организации судоремонтного производства и технической подготовки производства в системе «Судоремонт-35» на базе программного обеспечения фирмы «1С». Доказана необходимость разработки интегрированной системы управления подготовкой судоремонтного производства, обеспечивающей синхронизацию взаимодействия служб предприятия. Сделаны выводы о том, что на данном этапе развития техники, когда выросли требования к качеству судоремонта, старые формы и методы управления соответствующими производственными процессами себя полностью изжили. Однако, как и прежде, уровень качества судоремонта определяет увеличение сроков эксплуатации судов, эффективность и рентабельность работы флота.

Ключевые слова: судоремонтное производство, конструкторско-технологическая подготовка, технологические процессы, информационные технологии, механизация и автоматизация, управление качеством, бережливое производство, производительность, экономическая эффективность.

Increasing the efficiency of vessel repair by means of improvement of technological preparation of shipyard production

Tatyana Y. Pashaeva¹

Dmitry A. Ponomarenko²

¹*Murmansk State Technical University, Murmansk, Russia*

²*The branch «35 shipyard» JSC «CA «Zvezdochka», Murmansk, Russia*

Abstract: The article discusses the topical issues of ship repair production and technical preparation of production in the system "Sudoremont-35" on the basis of the software of the firm "1С." The need to develop an integrated ship repair management system to synchronize the interaction of the company's services has been proved. It has been concluded that at this stage of the development of technology, when the requirements for the quality of ship repair have toughened, the old forms and methods of management of the relevant production processes have become completely obsolete. However, as before, the level of quality of ship repair determines the increase in the lifespan of ships, efficiency and profitability of the fleet.

Keywords: ship repair production, design and technological training, technological processes, information technology, mechanization and automation, quality management, lean manufacturing, productivity, economic efficiency.

Введение

Основной целью технической подготовки судоремонтного производства является деятельность по организации производства, которая гарантирует протекание производственных процессов на высоком техническом уровне с учётом инновационных решений для обеспечения эффективной работы судоремонтного предприятия.

В традиционных системах управления судоремонтом процессы регулирования производства недостаточно регламентированы. Отсутствие достоверной оперативной информации о ходе производства работ приводит к принятию несвоевременных, а иногда неверных решений, что вносит известную долю аритмичности в производственную деятельность. Глубокий и всесторонний анализ производственной ситуации в целом по предприятию практически трудноосуществим. Актуальность диктуется техническим состоянием судоремонтного производства: многономенклатурного, преимущественно мелкосерийного и единичного, не соответствующего современным требованиям к уровню технологии и организации производственных процессов. Несовершенные технология и организация судоремонтного производства, использование малопроизводительного оборудования, значительная часть которого физически и морально устарела, не обеспечивают высокой производительности труда и качества продукции. Информационные системы используются неэффективно по причине несовершенства технической подготовки производства. В существующих на судоремонтном заводе условиях выпуск организационно-технологической документации зачастую выполняется вручную и связан с проведением большой рутинной работы по формированию маршрутно-технологических карт, материальных ведомостей и т.п. Объем таких работ составляет 70 ÷ 80 % рабочего времени технолога.

Наметившаяся в последнее время в филиале «35 СРЗ» АО «ЦС «Звёздочка» тенденция к росту объема ремонтных работ связана с увеличением заявляемых в ремонт механизмов и систем, а также резко увеличившимся количеством сопутствующих работ. Традиционные методы работы технологических служб не позволяют ограниченному количеству специалистов справиться с растущим объемом производства. Длительные простои судов в ремонте объясняются многими причинами: неподготовленностью завода к ремонту, нарушением технологии ремонта, несвоевременной поставкой материалов, деталей, узлов и механизмов, недостатком квалифицированных рабочих и инженерно-технических кадров. Принципиально важно создать на заводе такие условия, чтобы ни одна из причин не могла нарушить запроецированного технологического процесса, нормального хода его выполнения. В целях развития судоремонтного производства предлагается пересмотреть традиционные подходы, основанные на односторонних, бессистемных решениях в области организационно-технологического управления, автоматизации и механизации производственных процессов.

Организация технической подготовки судоремонта. Основные проблемы

Техническая подготовка представляет собой подготовительную стадию судоремонтного производства, охватывающую этапы конструкторской, технологической и организационно-технической подготовки производства. В судоремонте своевременная и высококачественная подготовка технической документации на ремонт судов и их переоборудование, разработка технологии ремонта судов, конструирование и изготовление необходимой технологической оснастки являются основным содержанием технологической подготовки производства.

В рамках технической подготовки судоремонтного производства можно выделить направления, тесно взаимосвязанные между собой: конструкторское и технологическое.

Конструкторско-технологическая подготовка производства – главное звено подготовительной стадии производства, которая должна осуществляться с определенным опережением начала производства. Опережение, необходимое для подготовки производства, должно определяться системой планирования.

Технологическая подготовка производства – совокупность взаимосвязанных процессов, обеспечивающих технологическую готовность к ремонту судов при установленных сроках, объеме и затратах. Разработка технологической документации в судоремонте – одна из важнейших задач подготовки производства. Разработка технологии предусматривает полный объем и номенклатуру работ по ремонту и переоборудованию судна, их ориентировочную трудоемкость и стоимость, технологическую последовательность работ, внедрение наиболее прогрессивных технологий и организаций ремонта судна, максимальную механизацию и автоматизацию трудоемких процессов и применение специальной технологической оснастки, а также специального инструмента при обработке и изготовлении деталей и узлов в процессе ремонта судов. В типовой технологии предусматривается разработка материальных ведомостей, норм расхода материалов, ведомостей поставок изделий и оборудования, необходимых для выполнения работ по отдельным звеньям, узлам и этапам. В технологии судоремонта происходит процесс расчленения и дифференциации технологических процессов на отдельные элементы, а затем интегрирование этих элементов в единый комбинированный процесс, выполняемый в одном технологическом потоке. Задача технологов заключается в определении достаточно полного и правильного объема ремонтных работ, обеспечении технологической последовательности их проведения, проектировании новой прогрессивной технологии выполнения ремонтных работ и наиболее эффективных методов производства.

Организационная подготовка охватывает комплекс вопросов производства по методам, системе, планированию работ, осуществляемых на подготовительной стадии. К организационной подготовке производства относятся планирование элементов технической подготовки производства, вопросы организации материального обеспечения, мероприятия по освоению производственной мощности, наладка оборудования и т.д. Цель организационной подготовки – создать необходимые условия для высокопроизводительной работы в процессе производства. Из множества проблем организации судоремонтного производства выделим наиболее актуальные:

- выбор высокоэффективных направлений механизации и автоматизации основных и вспомогательных процессов современного производства;
- эффективное использование средств производства;
- разработка направлений по сокращению сроков ремонта судов;
- создание научной системы рациональной подготовки производства;
- определение высокоэффективных направлений механизации и автоматизации труда с целью повышения производительности труда;
- рациональное использование производственных фондов судоремонтных предприятий;
- разработка и внедрение научных принципов организации и нормирования труда.

Организация судоремонтного производства строится на расчленении производственного процесса, изучении каждого элемента этого процесса, сборе расчлененной информации о каждом элементе процесса, изучении условий, в которых он протекает. Следующий процесс – интегрирование, обобщение всех этих элементов,

координация их взаимодействия в пространстве и во времени под общим управлением на базе управляющих устройств и программно-аппаратного комплекса технологической подготовки производства и управления производственным предприятием.

Интенсификация технологических процессов требует быстрого и точного учета хода производства, своевременного предотвращения намечающихся срывов нормального течения производственных процессов, соответственно, необходимы совершенные средства для получения переработки документации и форм оперативного руководства на производстве. Проблема заключается в том, что в судоремонте технические средства переросли организационные формы. Это несоответствие необходимо ликвидировать путем совершенствования организации производства и труда одновременно с совершенствованием техники и технологии. В настоящее время в судоремонте необходимо сочетание и использование элементов производства, при которых можно гарантированно обеспечить максимальную эффективность производства. Основная задача организации производства в судоремонте – обеспечить высококачественный ремонт судов в оптимально короткие сроки при наименьших затратах путем рационального сочетания темпов технического прогресса с эффективным использованием производственных фондов. В современных условиях развития судоремонтного производства возрастает значение правильно организованной технической подготовки производства, обеспечивающей быстрые темпы освоения и применения последних достижений науки и техники.

Решение вопросов технической подготовки судоремонтного производства

Одной из особенностей производственных процессов на судоремонтных предприятиях является их индивидуальность, так как объем и наименование производимых работ определяется отдельно для каждого судна в зависимости от характера дефектов и степени износа узлов и отдельных деталей, что увеличивает трудоемкость этапа технологической подготовки производства [1].

Процесс разработки документации на многих судоремонтных предприятиях носит смешанный характер. Реализация документооборота осуществляется классическим методом – на бумажных носителях. Наметившийся переход к использованию современных информационных технологий не позволяет в полной мере исключить возникновение негативных последствий несовершенства системы технического документооборота судоремонтных предприятий [2].

Новейшие разработки в области проектирования, конструкторско-технологической подготовки, инженерных расчетов не только проверены на практике, но и применяются в повседневной работе. На верфях 3D-модели используются для раскроя металла, для компоновки оборудования и моделирования прохождения труб и кабельных трасс. Но, к сожалению, не всегда и не везде. Недостатки в области информационных технологий напрямую влияют на достижение поставленных целей и реализацию стратегических задач. Существует необходимость внедрения систем автоматизации конструкторско-технологической подготовки и управления производством [3, 4].

На сегодняшний день процесс технологической подготовки судоремонтного производства невозможно представить без применения информационных технологий. Развитие технических средств способствует внедрению на судоремонтных предприятиях систем автоматизированного проектирования, при этом особую важность приобретает выбор эффективных средств автоматизации технической подготовки производства. Благодаря применению современных CAD/CAM/CAE-технологий у конструкторов появились возможности для создания более сложных инженерных проектов при сокращении сроков разработки. С применением данных технологий формируется единое информационное пространство, в котором находится

конструкторская документация. Интеграция систем автоматизации проектирования и систем автоматизации производственных процессов проходят одновременно.

При выборе основных организационно-программных решений необходимо принимать во внимание, что обработка информации, при которой технолог совершенно оторван от информационной нормативно-справочной базы данных, не соответствует требованиям современной организации производства. Существующие методы и средства оперативного планирования ремонта судов не позволяют учесть сложные взаимосвязи отдельных технологических процессов, осуществляемых в различных производственных подразделениях судоремонтного предприятия, не обеспечивают принятие эффективных целенаправленных решений в условиях ограниченных ресурсов. В качестве основного организационно-программного мероприятия необходимо решение о разработке специализированного автоматизированного рабочего места технолога.

Для современного судоремонтного производства характерны интенсивные информационные потоки. В традиционных системах управления судоремонтом ряд задач не решается из-за отсутствия исходной первичной информации, значительной трудоемкости и сложности алгоритмов ее обработки. Например, большое значение для определения действительной потребности в материальных ресурсах имеет установление количественной зависимости расхода материалов от конструкторско-технологических параметров ремонтируемых объектов и характеристик условий труда. Однако при ручных методах накопления и обработки информации регулярное решение такой задачи практически трудно реализуемо. Коренные преобразования управленческого труда, качественные сдвиги в организации и методах управления позволят практически осуществить интегрированные информационные системы управления, элементы цифрового предприятия.

К настоящему времени сложились три группы основных элементов цифрового предприятия: 1) поддержка технологий проектирования продукции; 2) цифровые элементы производства; 3) элементы управления предприятием [5].

В судоремонте основными видами подготовки производства являются: организационно-плановая, технологическая, конструкторская, материально-техническая, кадровая. В комплексной подготовке производства значительную роль играет технологическая подготовка. При этом лишь незначительная часть времени (менее 15%) затрачивается технологами на принятие решений, а остальное – на поиск нужной информации и оформление документации. Поэтому одним из основных направлений развития судоремонта является автоматизация технологической подготовки производства в части обеспечения информационной поддержки при проектировании технологических процессов ремонта, а также формирования, учета, контроля движения и корректировки ремонтной документации [6].

Переход к новым стандартам управления предприятием неразрывно связан с автоматизированными информационными системами, которые обеспечивают комплексное решение задач управления не только основными производственными, финансовыми и материальными ресурсами предприятий, но и ресурсами, которые обычно рассматриваются как вспомогательные – ресурсами клиентов [7].

Разработка и внедрение комплексной модели автоматизации в сфере судоремонта позволит на более высоком уровне решать вопросы формирования технологических процессов ремонта, сократить трудоемкость и сроки технологической подготовки производства, осуществлять электронный документооборот, а также отслеживать техническое состояние судовой техники на протяжении всего жизненного цикла [6].

В статье «Автоматизация судоремонтного предприятия – проблемы и решения» автор Купрашевич Ю.М. указывает на особенности автоматизации судоремонтного

производства филиала «35 СРЗ» АО «ЦС «Звёздочка», описывает этапы реализации проекта и результаты внедрения DATACore: MES на судоремонтном предприятии [8].

С учетом обозначенных позиций можно сделать вывод о том, что новые возможности совершенствования оперативного управления судоремонтным производством появились в связи с разработкой автоматизированных систем управления. На январь 2021 год в филиале «35 судоремонтный завод» АО «Центр судоремонта «Звёздочка» отделом автоматизированных систем управления производством продолжают работы по внедрению единой системы планирования и управления производством (ERP-системы) на базе российского программного обеспечения «1С ERP2: Управление предприятием» версии 8.3». Управление на основе информационных технологий сопровождается высоким уровнем профессиональной подготовки всех категорий персонала. Для реализации этой задачи в систему управления судоремонтным предприятием встроена система подготовки кадров, обладающая новейшими средствами вычислительной техники и программными продуктами. Филиал «35 судоремонтный завод» АО «Центр судоремонта «Звёздочка» активно сотрудничает с Мурманским государственным техническим университетом и Мурманским индустриальным колледжем в плане подготовки кадров для судоремонтного производства, повышения квалификации в области информационных технологий.

Взаимосвязь технической подготовки судоремонта и качества

Качественные показатели находятся в центре внимания: в настоящее время особенно остро встает вопрос повышения качества судоремонтных работ и эффективности труда. Система качественного судоремонта позволяет уменьшить внеэксплуатационный период и суммарные затраты на техническую эксплуатацию флота, обеспечить установленный уровень качества отремонтированного оборудования с целью снижения эксплуатационных расходов, освоение ремонта новых кораблей, судов и судовых технических средств, их модернизацию и др. [9].

Система планирования повышения качества в судоремонте является неотъемлемой частью, специальной функцией системы управления качеством продукции. Все виды технологий, применяемые в современном судоремонтном производстве должны обеспечивать выход качественного продукта и оптимальное использование ресурсов. В настоящее время в судоремонтном производстве популярность приобретают методы бережливого производства. Они должны обеспечить выход качественного продукта, оптимальное использование ресурсов, значительно повысить эффективность производства. Качество продукции – объект сознательного и планомерного воздействия в ходе управления современным и высокоразвитым производственным процессом. Необходимо формирование нового подхода или новой стратегии в управлении качеством и управлении подготовкой производства [10, 11, 12].

Вопросы качества судоремонта определяются действием многих случайных, местных и субъективных факторов. Все технические факторы, влияющие на качество продукции, предлагается разделить на две группы.

Первая группа – состояние, степень новизны и совершенства: основные фонды предприятия (технологическое оборудование, контрольно-измерительные средства, оснастка и т.п.). В этом отношении наибольшее значение имеет уровень механизации и автоматизации производственного процесса, при котором полностью или частично исключается субъективное влияние человеческого фактора на качество.

Вторая группа – группа технических факторов; относится к области технической подготовки производства.

Если рассматривать технику, технологию и организацию производства во взаимосвязи, то можно установить, что они развиваются по некоторым общим законам. В судоремонте между техникой, технологией и организацией производства

существует прямая зависимость. Проблемы сегодняшнего судоремонта – его низкое техническое обеспечение [13, 14, 15]. Однако позитивных изменений только в плане технического обеспечения производства недостаточно. Неудовлетворительные экономические показатели судоремонтных предприятий во многом объясняются несовершенством применяемой технологии, организации технического контроля, низким качеством технической документации и т.д. Указанные недостатки в работе инженерных служб совершенно нетерпимы в инновационных условиях управления производством.

Заключение

Положение России на мировом рынке судоремонта крайне неутешительное. Судовладельцы заказывают ремонт в зарубежных компаниях. Проблемы, стоящие перед судостроительной и судоремонтной промышленностью, заключается в том, что этот сектор сталкивается с жёсткой международной конкуренцией [16, 17].

Для достижения конкурентоспособности отечественных судоремонтных предприятий необходимым условием является выполнение организационных, технологических, экономических и прочих задач. Одна из наиболее значимых задач – автоматизация технологической подготовки судоремонтного производства.

Внедрение автоматизированного оборудования, систем технологической подготовки производства, методов организации и управления даст положительные результаты в повышении эффективности и качества технической документации, прозрачности и управляемости технологическим процессом в целом. Сущность новой системы организации подготовки производства должна состоять в своевременной технической подготовке производства [18]. Деятельность служб технической подготовки на судоремонтных предприятиях подлежит корректировке в соответствии с непрерывно возрастающими требованиями к качеству ремонтных работ и улучшению экономических показателей работы судоремонтных предприятий.

Литература

1. Повышение эффективности технологической подготовки производства на судоремонтных предприятиях / И.Н. Хрусталева, С.А. Любомудров, Т.А. Ларионова, А.А. Толстолец // Научно-технические ведомости СПбГПУ. - 2019. - №3. С. 86 - 96.
2. Огнева В. В. Особенности технического документооборота судоходных компаний и судоремонтных предприятий / В.В. Огнева // Научные проблемы водного транспорта. - 2013. №35. - С. 83 - 89.
3. Думин А.В. Новая ИТ-стратегия ОАО «Объединенная судостроительная компания» / А.В. Думин // Транспорт Российской Федерации. - 2017. - №3. - С. 33 - 36.
4. Рогулин А.Г. Использование компьютерных технологий в управлении и организации производства в судоремонте / А.Г. Рогулин, А.Г. Токликишвили // Инновационная наука. - 2015. - №7-1. С. 58 - 61.
5. Таранов А.Е. Подходы и направления цифровизации деятельности Крыловского государственного научного центра / А.Е. Таранов, М.А. Скулябин, Ю.С. Алексеев // Труды Крыловского государственного научного центра. - 2019. - С. 233-238.
6. Зяблов О.К. Автоматизация технологической подготовки судоремонтного производства / О.К. Зяблов, Е.В. Фунтикова // Научные проблемы водного транспорта. -2014. - №38. - С. 49 - 53.
7. Малыгин А.Н. Модернизация предприятий судостроения и судоремонта на основе внедрения автоматизированных информационных технологий / А.Н. Малыгин // *Juvenis scientia*. - 2017. - №7. - С. 26-29.
8. Купрашевич Ю. М. Автоматизация судоремонтного предприятия. Проблемы и решения / Ю.М. Купрашевич // Автоматизация в промышленности. - 2015. - № 8. - С. 22-23.

9. Семенов В. П. Повышение качества отечественного кораблестроения и судоремонта для усиления экономического присутствия России в Арктике / В.П.Семенов // Вестник МГТУ. - 2016. - №2. - С. 521 - 527.
10. Вумек Д. П., Джонс Д. Т. Бережливое производство. Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании / пер. с англ. М.: Альпина Паблишер, 2014. 472
11. Бережливое производство + шесть сигм : комбинируя качество шести сигм со скоростью бережливого производства / Майкл Джордж ; пер. с англ. [Ю. Сундстрем]. - 3-е изд. - Москва : Альпина Бизнес Букс : Ассоц. "Шесть Сигм", 2007. - 359 с. : ил.
12. Орлов В. Н. Бережливое производство как средство повышения эффективности производства и качества продукции / В.Н. Орлов, М.П. Гниломедова // Вестник Курганского государственного университета. - 2010. - №1 (17). - С. 171 - 173.
13. Михеева Т.А. Влияние качества подготовки производства на судостроительном предприятии на качество выпускаемой продукции / Т.А. Михеев, И.Н. Лучков, Е.Г. Бурмистров // Научные проблемы водного транспорта. - 2018. - №56. - С. 55 - 64.
14. Васильев А.М. Судоремонтное обеспечение морской экономической деятельности в Арктике: проблемы и пути решения / А.М. Васильев, В.Е. Храпов В.Е. // Региональная экономика: теория и практика. - 2010. - №12. - С. 6 -11.
15. Горин Е. А. Цифровые технологии в отечественном судостроении / Е.А. Горин // Бюллетень науки и практики. - 2017. - №11 (24). - С. 236-242.
16. Соловьев Э.В. Анализ рынка судостроения и судоремонта в развитии региональной экономики // *Juvenis scientia*. - 2017. - №7. - С. 19 - 22.
17. Challenges faced by the Shipbuilding Industry - https://ec.europa.eu/growth/sectors/maritime/shipbuilding_en (дата обращения 28.01.2021 г.)
18. Храпов В. Е. Инновационные преобразования на судоремонтных предприятиях как потребность устойчивого обеспечения морской деятельности / В.Е. Храпов, Т.В. Турчанинова // Вестник МГТУ. - 2010. - №1. - С. 120- 125.

References

1. I.N. Khrustaleva, S. A. Lyubomudrov, T. A. Larionova, A. A. Tolstoles «Improving the efficiency of technological preparation of production at ship repair enterprises» *Scientific and Technical vedomosti SPbGPU 3* (2019) : 86-96.
2. Ogneva V. V. «Features of technical document management of shipping companies and ship repair enterprises» *Scientific problems of water transport 35* (2013): 83-89.
3. Dumin A.V. «New IT strategy of JSC "United Shipbuilding Company» *Transport of the Russian Federation 3* (2017) 33-36.
4. Rogulin A. G. «The use of computer technologies in the management and organization of production in ship repair» *Innovative science 7-1* (2015): 58-61.
5. E. Taranov, M. A. Skulyabin, Yu. S. Alekseev «Approaches and directions of digitalization of the Krylov State Scientific Center» *Trudy Krylov State Scientific Center* (2019) : 233-238.
6. O. K. Zyablov, E. V. Funtikova «Automation of technological preparation of ship repair production» *Scientific problems of water transport 38* (2014) : 49-53.
7. Malygin A. N. «Modernization of shipbuilding and ship repair enterprises based on the introduction of automated information technologies» *Juvenis scientia 7* (2017): 26-29.
8. Yu. M. Kuprashevich «Automation of ship repair enterprises» *Problems and solutions» Automation in industry 8* (2015) : 22-23.
9. Semenov V. P. Improving the quality of domestic shipbuilding and ship repair for strengthening the economic presence of Russia in the Arctic / V. P. Semenov / / *Vestnik MSTU 2* (2016): 521-527.
10. Vumek D. P., Dzhons D. T. Berezhlivoe proizvodstvo. Kak izbavit'sja ot poter' i dobit'sja procvetaniya vashej kompanii. Per. s angl. M.: Al'pina Pablisher, 2014. 472 p.
11. Lean manufacturing + six Sigma: Combining the quality of six Sigma with the speed of lean manufacturing / Michael George; translated from English [Y. Sundstrom]. - 3rd ed. - Moscow: Alpina Business Books: Assoc. "Six Sigma", 2007. - 359 p.: ill.
12. Orlov V. N. Lean production as a means of improving production efficiency and product quality / V. N. Orlov, M. P. Gnilomedova // *Bulletin of the Kurgan State University 1* (2010): 171-173.

13. Mikheeva T. A. Influence of the quality of production preparation at a shipbuilding enterprise on the quality of manufactured products / T. A. Mikheev, I. N. Luchkov, E. G. Burmistrov // Scientific problems of water transport 56 (2018): 55 - 64.
14. Vasiliev A.M. Ship repair support of marine economic activity in the Arctic: problems and solutions / A.M. Vasiliev, V. E. Khrapov V. E. // Regional economy: theory and practice 12 (2010): 6 - 11.
15. Gorin E. A. Digital technologies in domestic shipbuilding / E. A. Gorin // Bulletin of Science and Practice 11 (2017): 236 - 242.
16. Solov'ev E. V. Analysis of shipbuilding and ship repair in the development of regional economy // Juvenis scientia 7 (2017): 19 - 22.
17. Challenges faced by the Shipbuilding Industry - https://ec.europa.eu/growth/sectors/maritime/shipbuilding_en (accessed 28.01.2021 g).
18. Khrapov V. E. Innovative transformations at ship repair enterprises as a need for sustainable provision of marine activities / V. E. Khrapov, T. V. Turchaninova // Bulletin of the Moscow State Technical University 1 (2010): 120 - 125.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Пашеева Татьяна Юрьевна, к.т.н., доцент кафедры технологии материалов и судоремонта, Мурманский государственный технический университет» (ФГАОУ ВО «МГТУ»), 183010, г. Мурманск, ул. Шмидта, 8, e-mail: tatjana-pasheeva@rambler.ru

Tatyana Y. Pasheeva, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Materials Technology and Ship Repair, Murmansk State Technical University (MSTU), 8, Schmidtaa str., Murmansk, 183010

Пономаренко Дмитрий Александрович, к.т.н., начальник отдела автоматизированных систем управления производством филиала «35 СРЗ» АО «ЦС «Звездочка», 183017, ул. Адмирала Лобова, д.100, e-mail: truemitrich@mail.ru

Dmitry A. Ponomarenko, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Automated Production Management Systems of the branch «35 SRZ» of JSC «TS «Zvezdochka», 100, State Admiral Lobov str., Murmansk, 183017

Статья поступила в редакцию 27.12.2020; опубликована онлайн 23.03.2021.
Received 27.12.2020; published online 23.03.2021.

УДК 629.12

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi66.155>

Методика оптимизации проектных характеристик скоростных пассажирских катамаранов

Ха Ван Зун¹

М.В. Китаев¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5345-6333>

¹Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

Аннотация. В настоящей статье рассмотрены основы методики оптимизации проектных характеристик скоростных пассажирских катамаранов (СПК). Цель работы состоит в определении роли и места предлагаемой методики в развитии морских пассажирских перевозок и островного туризма в Социалистической Республике Вьетнам и иллюстрации ее возможностей применительно к интересам разных участников этого процесса. Как правило, существующие суда приобретены на вторичном рынке, а новые часто проектируются и строятся на зарубежных верфях, поэтому необходимость разработки собственных методов проектирования, учитывающих региональные особенности Вьетнама, является очевидной. Новизна работы состоит в том, что предлагаемая методика учитывает региональные особенности, объединяет математические и оптимизационные модели различных уровней проектирования и позволяет учитывать интересы участников программы развития морской транспортной инфраструктуры и туризма Вьетнама. При разработке методики использованы методы теории корабля, проектирования судов, математического программирования и статистики. В статье приводятся результаты оптимизации проектных характеристик скоростных пассажирских катамаранов, выполнено их сравнение с главными размерениями современных судов рассматриваемого типа. Предлагаемая методика может использоваться при проектировании и оценке экономической эффективности скоростных пассажирских катамаранов, а полученные результаты - при разработке программы развития морской транспортной инфраструктуры и туризма Вьетнама.

Ключевые слова: методика, скоростные пассажирские катамараны, оптимизация, характеристики, математические модели, эффективность, региональные особенности.

The method for optimization of design characteristics of high speed passenger catamarans

Ha Van Duy¹

M.V. Kitaev¹

¹Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

Abstract. In this paper we discuss the theoretical principles of the method of design characteristics optimization of high-speed passenger catamarans. The goal of the paper is to determine the role and place of the proposed method in the development of sea passenger traffic and island tourism in the Socialist Republic of Vietnam and to illustrate its capabilities in relation to the interests of different participants of process. As a rule, the existing ships are purchased on the secondary market, and the new ones are often designed and built at foreign shipyards. This is a reason to develop the design methods that take into account the regional characteristics of Vietnam. The novelty of this research is based on the fact that the proposed method takes into account the regional features, combines mathematical and optimization models of various design levels and allows to consider the interests of participants of a program for development of maritime transport infrastructure and tourism in Vietnam. The

theoretical principles of ship theory, ship design, mathematical programming and statistics were used for the method development.

In this paper we present the results of design characteristics of high-speed passenger catamarans optimization and comparative analysis of these results with the main dimensions of modern high-speed passenger catamarans. The proposed method can be used in the design and assessment of the economic efficiency of high-speed passenger catamarans. The results can be used in Vietnam government program oriented to development of sea transport infrastructure and tourism.

Keywords: method, high-speed passenger catamarans, optimization, characteristics, mathematical models, efficiency, regional features.

Введение

Для осуществления морских пассажирских перевозок во Социалистической Республике Вьетнам (СРВ) используются суда различных типов: пассажирские и грузопассажирские паромы, круизные суда, скоростные катамараны и др. [2]. Динамика приобретения судоходными компаниями СРВ новых судов показывает, что катамараны хорошо зарекомендовали себя в сегменте морских пассажирских перевозок между материком и многочисленными островами, так как конструктивные особенности выделяют их на фоне судов других типов и обеспечивают ряд преимуществ, относящихся к мореходным качествам, безопасности мореплавания и комфорту [8, 15]. Следовательно, разработка методов и методик проектирования современных скоростных пассажирских катамаранов, учитывающих региональные особенности постройки и эксплуатации СРВ является актуальной задачей.

Развитие морского островного туризма в СРВ представляет собой процесс, ориентированный на долгосрочную перспективу [6], требующий комплексного подхода и кооперации в деятельности как частных компаний (туристических, строительных, научно-исследовательских, проектных, судостроительных, логистических, судоходных, банковского сектора и др.), часто выступающих в качестве инвесторов и заказчиков, так и государственных структур – правительства Вьетнама, включая различные его министерства, ведомства и службы.

Описание методики

Для определения роли и места рассматриваемой методики целесообразно выполнить декомпозицию задачи развития островного туризма в СРВ на составляющие, характеризующиеся своими целями и задачами, оценками эффективности, уровнями сложности, участниками и другими показателями.

Исходя из представленной на рис. 1 блок-схемы видно, что предлагаемая методика оптимизации проектных характеристик скоростных пассажирских катамаранов является связующим звеном между государством, частными инвесторами, судоходными компаниями, проектными бюро, представителями курортного бизнеса и туроператорами, позволяя оценивать эффективность различных вариантов создаваемой транспортной системы с учетом реальной потребности в пассажирских перевозках.



Рис. 1. Роль и место методики оптимизации проектных характеристик скоростных пассажирских катамаранов в развитии островного туризма

В рассматриваемой методике реализована возможность выбора уровня проектирования скоростных пассажирских катамаранов - внутренний и внешний [1]. Так, в рамках решения задач внешнего проектирования определяются тип и количество судов, отвечающих потребностям транспортной системы рассматриваемого района Вьетнама (верхний уровень), а также скорость и пассажировместимость новых судов (нижний уровень). В рамках решения задач внутреннего проектирования определяются соотношения главных размерений СПК (верхний уровень) и характеристики основных подсистем СПК (главного двигателя, редукторной установки и гребного винта) (нижний уровень).

Декомпозиция общей задачи проектирования скоростных пассажирских катамаранов на несколько подзадач, относящихся к разным уровням и обладающих различной степенью детализации проектных решений, позволяет использовать предлагаемую методику как на этапах концептуального проектирования и определения перспективных направлений развития морского и островного туризма в СРВ, так и при детальном проектировании судов катамаранного типа, включая выбор основных характеристик и элементов судна, а также отдельных его подсистем. В результате этого заказчики (государство или частные инвесторы) могут анализировать и сравнивать различные варианты проектных решений и способов осуществления пассажирских перевозок на рассматриваемой линии, учитывая те факторы, которые имеют наибольшее значение, не вдаваясь в детали решения задач, относящихся к нижележащим уровням.

Описание моделей

С позиций проектирования судов в предлагаемой методике реализованы модели, относящиеся к внешней и внутренней задачам, которые позволяют определять как количество и основные характеристики судов, так и главные размерения и характеристики отдельных подсистем. При этом результаты, полученные при решении внешней задачи проектирования, входят в состав исходных данных при решении задачи внутреннего проектирования [3].

Для автоматизации вычислений все модели, составляющие основу методики, реализованы в виде программных модулей - файл-функций, с заданным количеством входных и выходных аргументов. Такой подход позволяет сделать модели универсальными и использовать их при решении оптимизационных задач, относящихся к разным уровням проектирования.

Состав основных вычислительных блоков моделей:

- Выбор типа (уровня) задачи проектирования.
- Ввод исходных данных.
- Определение водоизмещения.
- Определение главных размерений и характеристик подсистем судна.
- Определение внешних воздействий и оценка мореходных качеств.
- Определение эксплуатационно-экономических показателей.
- Оптимизация проектных решений.
- Визуализация и вывод результатов оптимизации.

При этом в качестве исходных данных выступают величины, позволяющие учитывать региональные географические и эксплуатационные особенности, а также специфику проектирования и постройки скоростных пассажирских катамаранов во Вьетнаме, что положительно сказывается на адекватности моделей и достоверности результатов.

Перечень оптимизируемых переменных и исходных данных, относящиеся к математическим моделям разных уровней приведен в табл. 1.

Приведем обобщенную форму записи оптимизационных моделей:

Целевая функция.

$$\text{Minimize } F(X, C),$$

$$x \in R^n$$

где X – вектор оптимизируемых переменных; C – вектор требований технического задания, содержащий исходные данные.

Ограничения.

$$\begin{aligned} G_j(X, C) &\leq 0, & j = 1, \dots, m_e; \\ G_j(X, C) &= 0, & j = m_e+1, \dots, m; \end{aligned} \quad (1)$$

Требования к переменным.

$$(X_i)_{\min} \leq X_i \leq (X_i)_{\max}, \quad i = 1, \dots, n.$$

Для поиска оптимальных решений использован алгоритм последовательного квадратичного программирования или Sequential Quadratic Programming (SQP), учитывающий ограничения в виде линейных, нелинейных равенств и неравенств вида $c(x) < 0$, $\text{seq}(x) = 0$, $Ax < b$, $A_{\text{eq}}x = b_{\text{eq}}$ и последовательно решающий квадратичные программы путем минимизации функции Лагранжа с линейной аппроксимацией ограничений [11].

В табл. 1 показаны математические модели оптимизационных задач разных уровней.

Таблица 1

Модели оптимизации СПК

Название и составлявшие модели	Модель оптимизации характеристик	Модель оптимизации главных размеров	Модель оптимизации количества судов на линии	Модель оптимизации рабочей линии СПК
Целевая функция	$F(C, X) = Tok \rightarrow \min$	$F(C, X) = Tok \rightarrow \min$	$F(C, X) = Prof \rightarrow \max$	$F(C, X) = Tok \rightarrow \min$
Оптимизируемые переменные	$x_1 = n, x_2 = V_s$	$x_1 = L/B, x_2 = B/T, x_3 = C_b, x_4 = s/L$	$x_1 = N_{\text{ship}}$	$x_1 = \text{route}$
Ограничения	$7,16 \cdot D^{0,1667} \cdot V_s \leq 0$ $L/V_1^{1/3} - L/V_1^{1/3} \leq 0$ $L/V_1^{1/3} - L/V_1^{1/3} \leq 0$ $F_{n\min} - F_n \leq 0$ $F_n - F_{n\max} \leq 0$ и др.	$L/V_1^{1/3} - L/V_1^{1/3} \leq 0$ $L/V_1^{1/3} - L/V_1^{1/3} \leq 0$ $\frac{a_{co}}{g} - 0,5 \leq 0$ $\sum S - S_{\text{тр}} \leq 0$ $n - M_n \leq 0$ и др.	$t_{\text{work}} - 10 \leq 0$	$t_{\text{work}} - 10 \leq 0$
Требования к переменным	$n_{\min} \leq n \leq n_{\max}$ $V_{s\min} \leq V_s \leq V_{s\max}$	$(L/B)_1 \leq L/B \leq (L/B)_1^{\max}$ $(B/T)_1 \leq B/T \leq (B/T)_1^{\max}$ $(C)_b \leq C \leq (C)_b^{\max}$ $(s/L)_{\min} \leq s/L \leq (s/L)_{\max}$	$(N_{\text{ship}})_{\min} \leq N_{\text{ship}} \leq (N_{\text{ship}})_{\max}$	$1 \leq \text{route} \leq 10$

Таким образом, при использовании методики оптимизации проектных характеристик скоростных пассажирских катамаранов на каждом шаге (итерации) взаимодействуют соответствующая математическая модель проектирования и обозначенный алгоритм оптимизации. Направленный поиск оптимизируемых переменных, определяемых посредством соответствующих вычислительных блоков математической модели, в конечном счете приводит к оптимальному решению задачи проектирования судна.

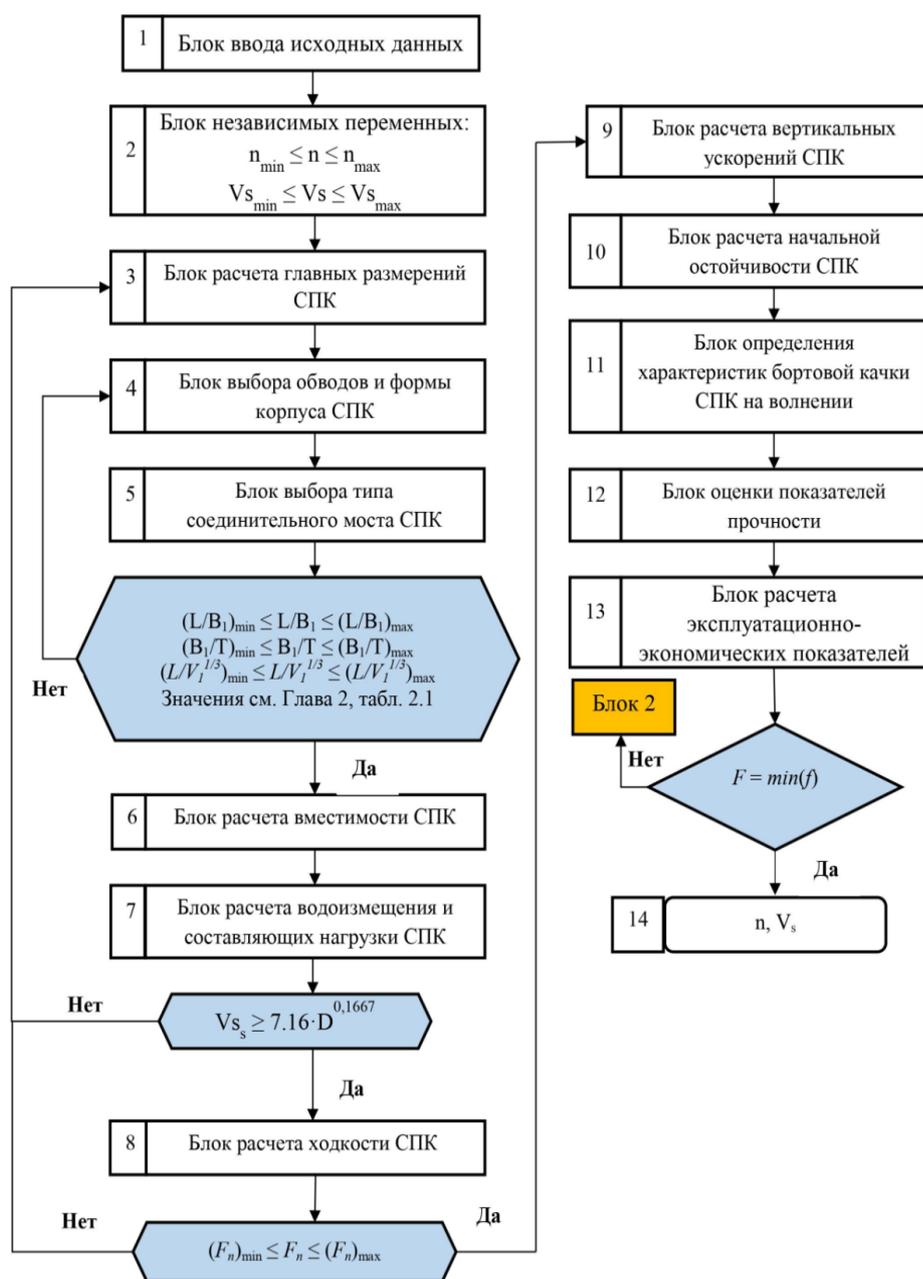


Рис. 2. Блок-схема математической модели оптимизации проектных характеристик скоростных пассажирских катамаранов

В качестве примера на рис. 2 покажем блок-схему модели оптимизации проектных характеристик скоростных пассажирских катамаранов. Из представленной блок-схемы видно, что модель состоит из отдельных вычислительных блоков, решающих определенные задачи теории корабля и проектирования судов и выполняющих проверку проектных и эксплуатационных ограничений [7, 14]. Так, в первом блоке вводятся исходные данные и требования технического задания. Во

втором - задаются независимые переменные и требования к ним (диапазоны изменения). В блоках 3 - 13, реализованы вычисления и алгоритмы, базирующиеся на основных положениях теории корабля и проектирования судов, которые подробно рассмотрены в работах [3, 9, 10, 12, 15]. Модель позволяет учитывать различные типы обводов корпуса и форм соединительных мостов СПК, для чего используются соответствующие расчетные методы [3 - 5].

Результаты оптимизации

В качестве примера для линии г. Ратьза – о. Фукуок в табл. 2 - 4 и на рис. 3 показаны результаты оптимизации проектных характеристик скоростных пассажирских катамаранов.

В блоке ввода исходных данных задавались высота волны, скорость ветра, расстояние между портами, цена билета, ставка налога в СРВ и коэффициент загрузки катамарана пассажирами, а также учитывалось фактическое распределение пассажиропотока в течение года [13].

Таблица 2

Результаты оптимизации проектных характеристик СПК

Тип обводов	Результаты оптимизации по критерию срок окупаемости (F_1)		
	п, чел.	Vs, уз.	F, год
Плоскокилеватые	251	23.52	2.27
Круглоскулые	246	27.08	1.96
V-образные	252	25.83	2.47
	Результаты оптимизации по критерию прибыль (F_1)		
	п, чел.	Vs, уз.	Prof, м.\$
Плоскокилеватые	274	31.87	1.118
Круглоскулые	278	30.34	1.269
V-образные	275	31.37	1.089

Таблица 3

Результаты оптимизации главных размерений СПК

Тип обводов	Результаты оптимизации по критерию срок окупаемости (F_2)							
	п, чел.	Vs, уз.	L/V ₁	V ₁ /T	C _b	s/L	Pr, м.\$	F, год
Плоскокилеватые	251	23.52	11.43	1.99	0.56	0.22	1.022	2.27
Круглоскулые	246	27.08	13.09	1.64	0.60	0.23	1.187	1.97
V-образные	252	25.83	12.15	1.64	0.49	0.23	1.055	2.25
	Результаты оптимизации по критерию прибыль (F_2)							
	п, чел.	Vs, уз.	L/V ₁	V ₁ /T	C _b	s/L	Pr, м.\$	F, год
Плоскокилеватые	274	31.87	11.91	1.93	0.56	0.22	1.118	2.57
Круглоскулые	278	30.34	13.38	1.64	0.60	0.22	1.266	2.07
V-образные	275	31.37	12.07	1.66	0.48	0.22	1.103	2.58

Таблица 4

Результаты оптимизации главных размерений ПСК

Тип обводов	Результаты оптимизации по критерию срок окупаемости							
	L ₀ , м	L, м	В ₀ , м	V ₁ , м	H, м	T, м	D _w , т	D, т
Плоскокилеватые	30.43	28.66	8.75	2.51	2.88	1.25	33.37	102
Круглоскулые	30.24	28.49	8.73	2.18	3.05	1.32	33.05	101
V-образные	30.47	28.7	8.87	2.36	3.3	1.44	33.43	103
	Результаты оптимизации по критерию прибыль							
	L ₀ , м	L, м	В ₀ , м	V ₁ , м	H, м	T, м	D _w , т	D, т
Плоскокилеватые	31.29	29.45	8.87	2.47	2.96	1.28	34.84	107

Круглоскулые	31.44	29.59	8.89	2.21	3.1	1.35	35.1	108
V-образные	31.33	29.5	9	2.44	3.39	1.47	34.9	108

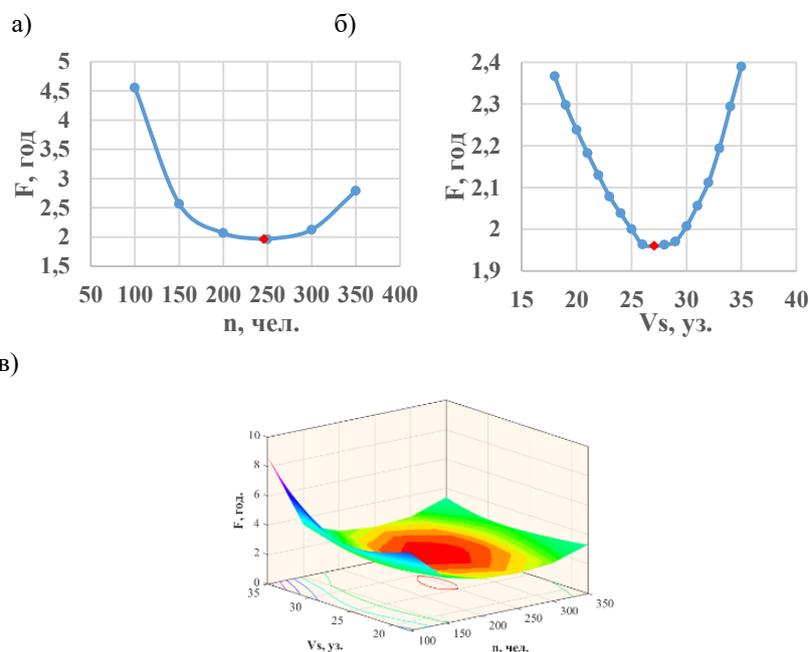


Рис.3. Результаты оптимизации проектных характеристик СПК для круглоскулых обводов: а. зависимость срока окупаемости от пассажировместимости; б. зависимость срока окупаемости от скорости; в) зависимость срока окупаемости от пассажировместимости и скорости

Вблизи острова Фукуок можно выделить около 10 направления пассажирских перевозок, основные из которых показаны в табл. 5. Пять из десяти маршрутов обслуживают местные судоходные компании, остальные можно рассматривать как потенциальные, которые будут развивать в ближайшем будущем. Стоимость пассажирского билета для разных линий определялась исходя из анализа текущей стоимости перевозок в районе острова Фукуок и протяженности рассматриваемой пассажирской линии.

Далее, приведем пример расчета по закреплению существующего судна за конкретной линией эксплуатации, т.к. определение оптимальных, с экономической точки зрения, маршрутов пассажирских перевозок является первоочередной задачей для частных транспортных компаний, осуществляющих морские перевозки. Это относится, в том числе, и к развитию новых направлений перевозок, на которых возможно использовать как вновь создаваемые, так и существующие суда-претенденты. В основе рассматриваемой модели лежит тот факт, что после постройки строительная стоимость, характеристики и элементы судна остаются неизменными, а линии эксплуатации судна могут меняться, что приводит к изменению эксплуатационных расходов.

Таблица 5

Пассажирские линии на о. Фукуок и близлежащие острова

№	Маршруты	График перевозок	Статус
1	Rach Gia – Phu Quoc	двусторонний	эксплуатируется
2	Rach Gia – Hon Son	двусторонний	планируется
3	Rach Gia – Nam Du	двусторонний	эксплуатируется
4	Rach Gia – Nam Du – Phu Quoc	двусторонний	эксплуатируется
5	Rach Gia – Phu Quoc – Nam Du	двусторонний	планируется
6	Ha Tien – Phu Quoc	двусторонний	эксплуатируется
7	Ha Tien – Phu Quoc – Rach Gia	двусторонний	эксплуатируется
8	Ha Tien – Phu Quoc – Nam Du	двусторонний	планируется
9	Ha Tien – Phu Quoc – Nam Du – Hon Son – Rach Gia	в одну сторону	планируется
10	Rach Gia – Phu Quoc – Nam Du – Rach Gia	в одну сторону	планируется

Результаты расчетов для разных форм обводов корпуса показаны в табл. 6. Жирным выделены оптимальные маршруты перевозок. Исходные данные по судам-претендентам, осуществляющим перевозки на рассматриваемых маршрутах приведены в табл. 3-5.

Таблица 6

Результаты определение маршруты эксплуатации по критерию срок окупаемости

Плоскокилеватые										
Маршруты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F ₄	2.72	5.36	3.25	2.21	4.04	1.62	3.17	1.75	2.89	2.44
Pro*	0.86	0.44	0.71	1.05	0.58	1.44	0.74	1.33	0.81	0.96
N _{trip}	2	2	3	2	1	5	1	2	1	1
Круглоскулые										
Маршруты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F ₄	1.55	5.26	3.18	2.19	4.01	1.63	1.23	1.77	2.89	2.42
Pro*	1.51	0.44	0.74	1.07	0.58	1.43	1.89	1.32	0.81	0.97
N _{trip}	3	2	3	2	1	5	2	2	1	1
V-образные										
Маршруты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F ₄	1.79	6.89	4.06	2.60	4.84	1.79	1.37	1.93	3.33	2.87
Pro*	1.33	0.35	0.59	0.92	0.49	1.33	1.74	1.23	0.71	0.83
N _{trip}	3	2	3	2	1	5	2	2	1	1

Принятые обозначения: Pro* - чистая прибыль в млн. долл.; N_{trip} – количество рейсов.

На рис. 4 показан пример интерфейса и вывода результатов в графическое окно программы, разработанной автором в среде Matlab GUI.

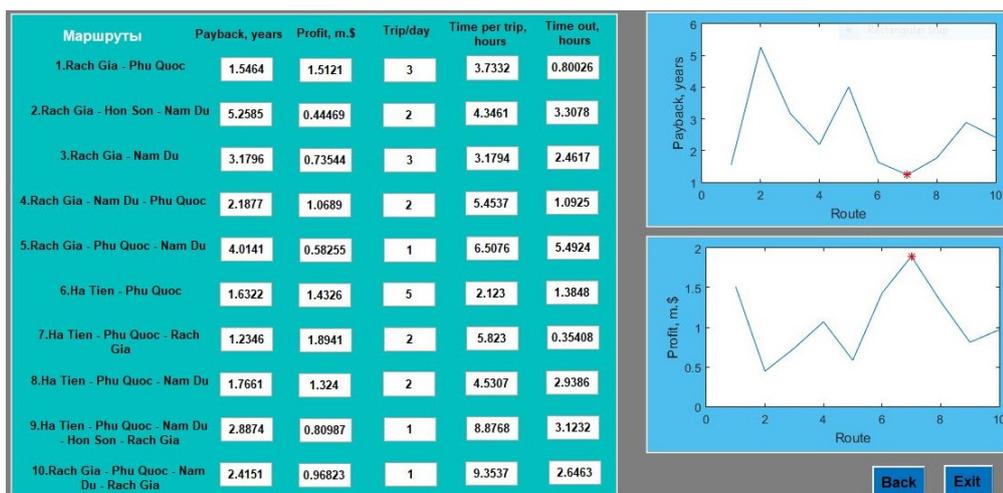
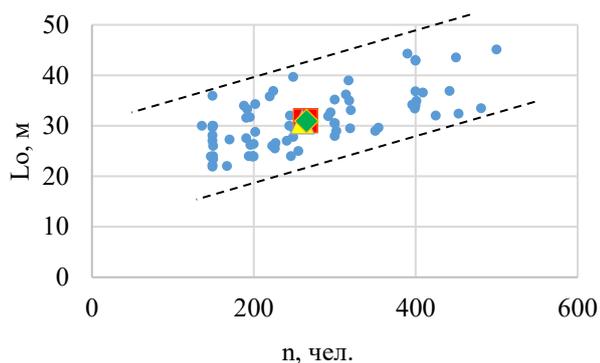


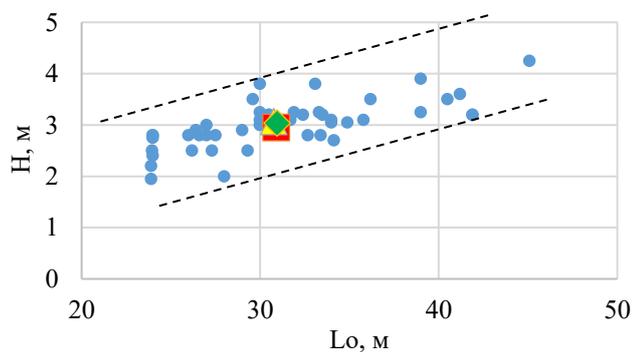
Рис. 4. Пример представления результатов

Результаты, получаемые при решении оптимизационных задач, имеют практическое значение только в том случае, если математические модели объектов проектирования являются адекватными, а результаты достоверными. Так, для оценки достоверности полученных результатов на рис. 5 показан пример сравнительной оценки расчетных данных с размерениями современных СПК.

а)



б)



в)

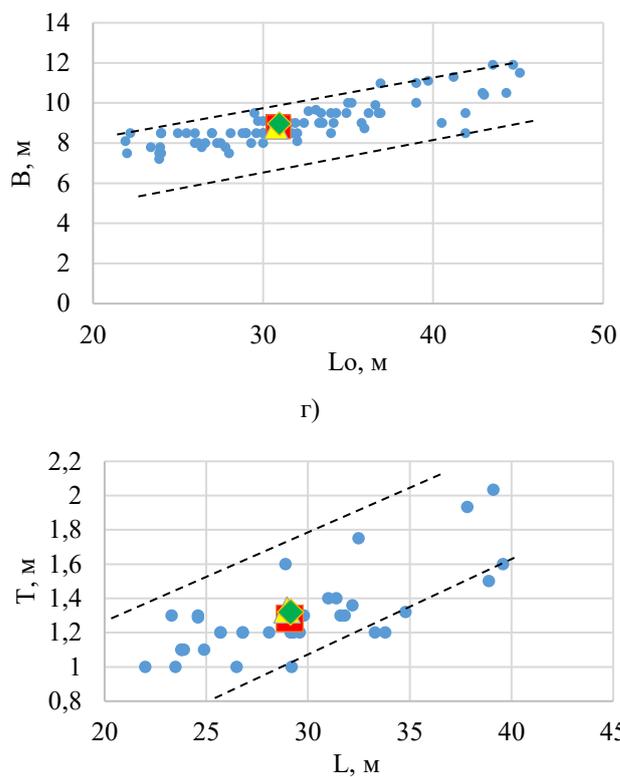


Рис. 5. Оценка достоверности результатов:
 а - зависимости наибольшей длины от пассажировместимости; б - зависимости наибольшей ширины от наибольшей длины; в - зависимость высоты борта от наибольшей длины; г - зависимость осадки от длины по ватерлинии

Полученные результаты могут быть использованы для создания 3D-моделей и дальнейшей отработки формы корпуса, решения вопросов гидро- и аэродинамики, общего расположения и внешней архитектуры. На рис. 6 показаны модели, построенные в Solid Works, размеры которых получены в результате оптимизации по критерию срока окупаемости.

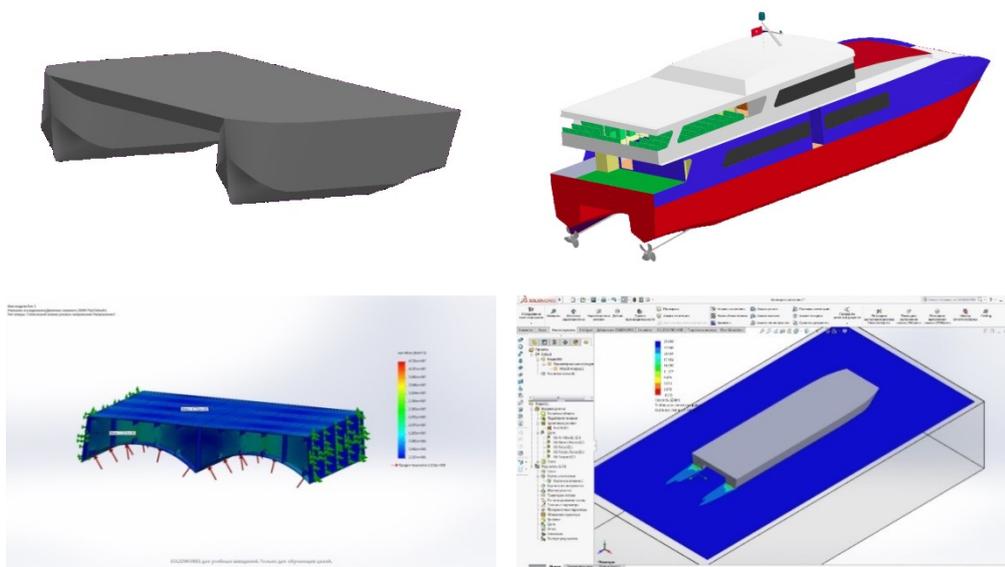


Рис. 6. Создание моделей для дальнейшего анализа средствами САПР

Заключение

В представленной работе рассмотрены основы методики оптимизации проектных характеристик скоростных пассажирских катамаранов по экономическим критериям, обозначены ее роль и место в развитии морского и островного туризма в СРВ с учетом взаимодействия всех заинтересованных участников этого процесса. Рассмотрены математические модели:

- оптимизации проектных характеристик СПК;
- оптимизации элементов (главных размерений) СПК;
- оптимизации количества судов, работающих на заданной линии перевозок;
- определения оптимальной линии пассажирских перевозок с учетом перспективных направлений и развития морского туризма;
- оптимизации типа и характеристик судовых подсистем, в качестве которых рассматривались главный двигатель и редукторная установка.

Рассмотрен пример передачи результатов оптимизации в систему автоматизированного проектирования посредством таблицы параметров, что позволяет реализовать автоматизированный подход к проектированию СПК.

Литература

1. Гайкович А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов: в 2 т. Т.1. Описание системы «Корабль» / А.И. Гайкович // СПб.: Изд-во НИЦ МОРИНТЕХ, 2014. 819 с.
2. Китаев М.В. Анализ морских пассажирских перевозок и типов судов в Социалистической Республике Вьетнам / М.В. Китаев, Ха Ван Зуи // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2018. № 3 (36). С. 65–75.
3. Китаев М.В. Математическая модель оптимизации проектных характеристик скоростных пассажирских катамаранов / Ха Ван Зуи, М.В. Китаев // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета, 2020, №3(44), с. 46 – 59.

4. Ха Ван Зуи Анализ методов расчета сопротивления пассажирских катамаранов: Сравнение методов / М.В. Китаев, Ха Ван Зуи // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета, 2019, №4 (41), с. 64 – 73.
5. Armstrong N.A. On the Added Resistance of Catamarans in Waves / N.A. Armstrong, A. Schmieman // Presented at the 8th Intern. Conf. on Fast Sea Transportation, FAST-2005. St Petersburg, 2005. pp. 1-8.
6. Bui Van Minh. Vietnam maritime economy and measures for improving the enforcement and effectiveness of maritime administration / Van Minh Bui, Quoc Tien Le // Maritime Science and Technology Magazine. 2016(3); 46:122–127.
7. DNV GL. Rules for classification of high speed and light craft. January 2020.
8. Gee N. Future Design Trends in High Speed Vessels / N. Gee // High-speed vessels future development conference, Victoria, Canada, 27-28 May 1999, p. 31.
9. Molland A.F. Ship Resistance and Propulsion 2nd ed. /A.F. Molland, S.R. Turnock, D.A. Hudson // Cambridge Univ. Press, (2017), 626 p.
10. Moraes H.B. Multiple criteria optimization applied to high speed catamaran preliminary design / H.B. Moraes, J.M. Vasconcellos, P.M. Almeida // Ocean Engineering, 2007, no. 34, pp. 133 – 14.
11. Philip E.G. Sequential quadratic programming methods / E.G. Philip // UCSD Department of Mathematics Technical Report NA-10-03 August 2010.
12. Sahoo P.K. Practical evaluation of resistance of high-speed catamaran hull forms / P.K. Sahoo, V. Salas, A. Schwetz // Part 1. Ships and Offshore Structures. (2007); 2(4):307–324.
13. Sớ dụ lịch tỉnhkiêngiang. Kien Giang Department of Tourism. URL: <https://sdl.kien-giang.gov.vn/trang/TinTuc/tinchuyenmuc.aspx?chuyenmuc=116> – 11.02.2021.
14. Vietnam Register. National Technical Regulation Classification and Construction of High Speed Craft. Hanoi, 2020.
15. Yun L. High Speed Catamarans and Multihulls: Technology, Performance, and Applications / L. Yun, A. Bliault, H. Z. Rong // Springer 2019, p. 783.

References

1. Gajkovich A.I. Teoriya proektirovaniya vodoizmeshchayushchih korablej i sudov: v 2 t. T.1. Opisanie sistemy «Korabl» / A.I. Gajkovich // SPb.: Izd-vo NIC MORINTEKH, 2014. 819 s.
2. Kitaev M.V. Analiz morskikh passazhirskih perevozok i tipov sudov v Socialisticheskoy Respublike V'etnam / M.V. Kitaev, Ha Van Duy // Vestnik Inzhenernoj shkoly DVFU. 2018. № 3 (36). S. 65–75.
3. Kitaev M.V. Matematicheskaya model' optimizacii proektnyh harakteristik skorostnykh passazhirskih katamaranov / Ha Van Duy, M.V. Kitaev // Vestnik Inzhenernoj shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta, 2020, №3(44), s. 46 – 59.
4. Ha Van Duy Analiz metodov rascheta soprotivleniya passazhirskih katamaranov: Sravnenie metodov / M.V. Kitaev, Ha Van Duy // Vestnik Inzhenernoj shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta, 2019, №4 (41), s. 64 – 73.
5. Armstrong N.A. On the Added Resistance of Catamarans in Waves / N.A. Armstrong, A. Schmieman // Presented at the 8th Intern. Conf. on Fast Sea Transportation, FAST-2005. St Petersburg, 2005. pp. 1-8.
6. Bui Van Minh. Vietnam maritime economy and measures for improving the enforcement and effectiveness of maritime administration / Van Minh Bui, Quoc Tien Le // Maritime Science and Technology Magazine. 2016(3); 46:122–127.
7. DNV GL. Rules for classification of high speed and light craft. January 2020.
8. Gee N. Future Design Trends in High Speed Vessels / N. Gee // High-speed vessels future development conference, Victoria, Canada, 27-28 May 1999, p. 31.
9. Molland A.F. Ship Resistance and Propulsion 2nd ed. /A.F. Molland, S.R. Turnock, D.A. Hudson // Cambridge Univ. Press, (2017), 626 p.
10. Moraes H.B. Multiple criteria optimization applied to high speed catamaran preliminary design / H.B. Moraes, J.M. Vasconcellos, P.M. Almeida // Ocean Engineering, 2007, no. 34, pp. 133 – 14.
11. Philip E.G. Sequential quadratic programming methods / E.G. Philip // UCSD Department of Mathematics Technical Report NA-10-03 August 2010.
12. Sahoo P.K. Practical evaluation of resistance of high-speed catamaran hull forms / P.K. Sahoo, V. Salas, A. Schwetz // Part 1. Ships and Offshore Structures. (2007); 2(4):307–324.

13. Sớ du lịch tỉnhkiêngiang. Kien Giang Department of Tourism. URL: <https://sdl.kien-giang.gov.vn/trang/TinTuc/tinchuyenmuc.aspx?chuyenmuc=116> – 11.02.2021.
14. Vietnam Register. National Technical Regulation Classification and Construction of High Speed Craft. Hanoi, 2020.
15. Yun L. High Speed Catamarans and Multihulls: Technology, Performance, and Applications / L. Yun, A. Bliault, H. Z. Rong // Springer 2019, p. 783.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ха Ван Зуи, аспирант, департамента Морской техники и транспорта, Политехнический институт (Школа), Дальневосточный федеральный университет (ФГАОУ ВО «ДВФУ»), 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс-10, e-mail: vnmured4289@gmail.com

Ha Van Duy, postgraduate student of the department of Marine Engineering and Transport, Polytechnic Institute (School), Far Eastern Federal University, 10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, 690922

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

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

Статья поступила в редакцию 10.02.2021; опубликована онлайн 23.03.2021.
Received 10.02.2021; published online 23.03.2021.

УДК 629.128

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi66.146>

Опыт эксплуатации и совершенствования речных док-кессонов

С.Е. Шалак¹

А.А. Кеслер¹

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

Аннотация. Цель данной работы заключается в сборе, анализе и обобщении информации по эксплуатации речных док-кессонов. В настоящее время док-кессоны строятся крайне редко, несмотря на их преимущества. Однако судоподъемные сооружения не теряют своей актуальности. В работе проведен анализ построенных док-кессонов, предназначенных для кессонирования оконечностей пассажирских и грузовых судов и докования малых судов, а именно, их принципиальных конструктивных исполнений; анализ корпусов, систем и устройств, а также опорных конструкций на стапель-палубе; выявлены основные проблемы и поиск их решений. Проведен патентный поиск по данной теме и выявлены наиболее удачные решения. Результаты работы представляют собой обобщенную информацию об эксплуатации док-кессонов и позволяют оптимизировать дальнейшее их проектирование, строительство и эксплуатацию с учетом накопленного опыта, а также позволяют избежать ошибок, которые были допущены ранее. В результате данной работы были выявлены некоторые аспекты эксплуатации судоподъемных сооружений, которые при проектировании не были учтены.

Ключевые слова: док-кессон, стапель-палуба, топ-палуба, шлюз-перегородка, балластная система, грузовые устройства, понтон, башни, система набора.

Main characteristics of dock-caissons, their use in the river fleet system and improvements after commissioning

Sergey E. Shalak¹

Anatoly A. Kesler¹

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

Abstract. The purpose of this work is to collect, analyze and generalize information on the operation of river dock-caissons. Currently, dock-caissons are rarely built despite their advantages. However, ship-lifting structures do not lose their relevance. The paper analyzes the constructed dock-caissons, intended for caissoning the passenger and cargo ships and docking of small vessels (their fundamental design, analysis of hulls, systems and devices, as well as supporting structures on the slipway-deck), identifies the main problems and search of their solutions. A patent search on this topic was carried out and the most successful solutions were identified. The results of the work represent generalized information about the operation of dock-caissons and allow to optimize their design, construction and operation in the future, taking into account the accumulated experience, as well as enable to avoid mistakes that were made earlier. As a result of this work, some aspects of the operation of the ship-lifting structures that were not taken into account in the design were identified.

Keywords: Dock-caisson, dock floor, top-deck, lock-partition, ballast system, cargo devices, pontoon, towers, set system/

Введение

В системе отечественного речного флота для проведения осмотра и ремонта движительно-рулевого комплекса (далее ДРК) и оконечностей корпуса судов широко используются док-кессоны. По сравнению с другими судоподъемными сооружениями они имеют меньшие габариты и стоимость, требуют меньших затрат по содержанию [1].

Исследование основано на широком изучении опыта эксплуатации существующих док-кессонов и анализа современных технических решений, требований Правил Российского Речного Регистра [2], охраны труда и окружающей среды, а также оценки возможностей кессонирования пассажирских судов с помощью построенных док-кессонов. Результаты работы могут помочь при обосновании архитектурно-конструктивного типа, основных характеристик, грузового устройства, элементов балластной системы, ограждения кессонного пространства при проектировании новых док-кессонов.

Архитектурно-конструктивные типы док-кессонов и их основные характеристики

В настоящее время при проведении ремонтно-профилактических работ на речных судах осушение их ДРК выполняется с помощью доков или док-кессонов. Ниже представлены сведения только по эксплуатирующимся док-кессонам. В системе речного флота используются док-кессоны проектов 2675, 633, р-101, 634а, 814 и 684. В таблице 1 представлены значения характеристик этих судов, принятые по их проектной документации согласно [3] и [4]. Ряд эксплуатирующихся док-кессонов в той или иной мере были переоборудованы или реконструированы, информация об этом приведена ниже. Все представленные док-кессоны можно отнести к одному из двух конструктивных типов [5]:

1) Док-кессон с двумя параллельными башнями и воротами между ними (см. гр.1 таблицы 1).

2) Док-кессон с тремя башнями и трапецидальной формой стапель палубы. (см. гр. 1 таблицы 1).

Док-кессон 1-го типа также называют проходным, а 2-го типа - непроходным, при этом имеются в виду возможности размещения докующего судна по длине стапель-палубы. При выполнении этой судоподъемной операции ворота док-кессона первого типа обычно открываются и створки размещаются вдоль башен. Процесс кессонирования оконечности судов в док-кессонах 1 и 2 типов не имеет принципиальных отличий. В том и в другом случаях оконечность судна заводится в объём над стапель-палубой, который ограничен с 3 сторон жесткими герметичными конструкциями: у док-кессона 1-го типа - бортовыми башнями и воротами, у 2-го типа-башнями [11].

Прочность корпуса док-кессона так же, как и судна другого типа в значительной мере зависит от используемой системы набора [6]. Как видно из таблицы 1, у большинства док-кессонов понтон и башни выполнены по поперечной системе набора. Лишь у судна проекта 684, имеющего сравнительно небольшие размеры стапель-палубы, для понтона принята продольная система набора, при этом рамная шпация составляет 1200 мм.

Суда проектов 2675 и 633 имеют близкие значения габаритных размеров и в то же время их понтоны выполнены с разными системами чередования шпангоутов: у док-кессона проекта 2675 рамная шпация составляет 1200мм, а у другого – 2400мм. Это обстоятельство оказывает существенное влияние как на поперечную прочность корпуса судна, так и местную прочность стапель-палубы. Вследствие перегрузки док-

кессона проекта 633 из-за недосмотра команды, произошёл его перелом. Возможно, это произошло из-за неудачно выбранной рамной шпации. В результате судно было выведено из эксплуатации для проведения ремонта. Грузоподъёмность восстановленного дока была ограничена 400т вместо 600т.

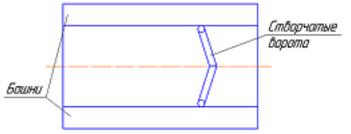
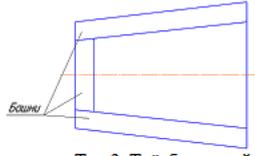
Эксплуатация док-кессонов позволила проверить в работе принятые решения по корпусной части. Был выявлен ряд недостатков: все они связаны с прочностью понтона. Так, на двух док-кессонах проекта Р-101 усилена конструкция понтона на участке расположения опор, то есть кильблоков, на стапель палубе [6]. Существенные повреждения стапель-палубы имели место на док-кессоне проекта 814.

Проектом на всех док-кессонах предусмотрено грузовое устройство, предназначенное, прежде всего, для перемещения ремонтируемых или заменяемых частей движительно-рулевого комплекса со стапель-палубы на береговое или плавучее транспортное средство и обратно [2][3].

В качестве такого устройства применяются: грузовая стрела, поворотная кран-балка, возвышающийся над топ-палубой монорельсовый кран.

Таблица 1

Главные размерения и основные характеристики док-кессонов

Характеристика	Номер проекта док-кессона					
	2675	633	Р-101	634А	814	684
1. Архитектурно-планировочная схема	 <p>Тип 1. Двухбашенный со створчатыми воротами</p>		 <p>Тип 2. Трёхбашенный с трапециевидной формой стапель-палубы</p>			
2. Длина габаритная, м	39,4	35,8	34,2	31,6	31,5	23,3
3. Ширина габаритная, м	29,8	29,5	21,7	15,4	15,7	20,4
4. Высота борта, м	7,4	6,8	7,6	4,2	4,1	4,4
5. Высота понтона	1,4	1,4	1,4	1,2	1,0	1,3
6. Осадка средняя с полным балластом, м	6,0	6,0	6,77	4,6	3,55	3,4
7. Осадка порожнем, м	0,47	0,44	0,45	0,4	0,33	0,28
8. Масса порожнем, т	455	368	281	117	103	90
9. Суммарный объём балластных цистерн, м ³	2500	2650	1568	370	336	522
10. Производительность и количество насосов балластной системы, м ³ /ч	800/2	800/2	300/2	200/2	220/2	250/2

Практика эксплуатации док-кессонов свидетельствует, что в ряде случаев предусмотренное проектом грузовое устройство не используется, так как принято альтернативное устройство [6].

Согласно [7] построенные док-кессоны используются следующим образом:

Док-кессон проекта 684 используется в основном, для кессонирования кормовой оконечности речных танкеров.

Док-кессон проекта 634А применяется для кессонирования оконечностей пассажирских судов.

Проект 633 используется только в качестве дока - осуществляет подъем из воды малотоннажных пассажирских судов, буксиров и толкачей массой не более 400 т.

Два док-кессона проекта 814 используются по-разному: первый док-кессон применяется только для докования судов различного назначения массой до 120т, второй док-кессон используется, в основном, для кессонирования кормовой оконечности сухогрузных теплоходов грузоподъемностью 500-700т.

Из числа док-кессонов с трапецидальной формой стапель-палубы наибольшие размеры имеют суда проектов Р-101. Два из них применяются для полного осушения судов массой до 200т и оголения ДРК сухогрузных теплоходов грузоподъемностью до 3000 тонн путем создания дифферента. При этом в носовую оконечность теплоходов принимается балласт. Дифферент относительно коротких и более прочных судов обеспечивается без приема в них балласта.

Из числа построенных док-кессонов наибольшие размеры имеют судна проекта 2675. Всего сдано в эксплуатацию три судна, два из них используются только для докования. Третий док-кессон выполняет в основном, кессонирование оконечностей крупных водоизмещающих пассажирских судов.

Выявленные недостатки и внесенные изменения касаются различных частей док-кессона и сторон его эксплуатации: удобства постановки судна или его оконечности на стапель-палубу, условий доступа и пребывания на док-кессоне его экипажа, экипажа кессонируемого судна и рабочих ремонтного цеха, ведения работ по демонтажу и монтажу частей ДРК.

Постановка судна в док-кессон занимает 1-1,5 часа, при этом используются в основном швартовные механизмы док-кессона [2].

Дополнительно к предусмотренным по проекту швартовным механизмам по одному шпилю было установлено на док-кессонах проекта Р-101. Этот шпиль размещен в диаметральной плоскости на поперечной башне и используется как при заводке судна, так и проведении монтажа-демонтажа частей ДРК. В последнем случае, с помощью троса со шпиля, который пропускается через систему роликов и рымов, удерживаются под судном или перемещаются по стапель-палубе винты, рули и другое оборудование. Наряду с отмеченным приемом для перемещения ДРК применяются ручные тали, съёмники различных типов и другие переносные приспособления и инструмент, которые зачастую хранятся на док-кессоне.

Опыт свидетельствует, что вопросы об удобстве перемещений с берега на док-кессон, по док-кессону и с последнего на докуемое или кессонированное судно придаётся важное значение [7]. По этой причине на двух док-кессонах проекта 2675 в башнях были вырезаны объёмы для размещения съёмных трапов, ведущих на смежное плавсредства или пирс. Кроме того, на док-кессоне, выполняющем обслуживание пассажирских судов, установлен подъёмно-опускной трап для доступа с него на судно, а также поднят на 1м проход по верху ворот с одной башни на другую. На док-кессоне проекта 814 на внутреннем борту одной из продольных башен закреплена платформа с целью улучшения условий докования малых судов и доступа на них.

Существенные изменения в процессе эксплуатации док-кессонов произошли в средствах транспортировки частей ДРК со стапель-палубы на берег и обратно [7].

Так, сняты грузовые стрелы на док-кессоне проекта Р-101. На док-кессонах проекта 2675 грузовое устройство не устанавливалась как при постройке, так и в процессе эксплуатации. Все эти док-кессоны работают на акваториях крупных судоремонтных предприятий и обслуживаются плавкранами.

Представленный обзор схем транспортировки частей ДРК между эксплуатирующимися док-кессонами и берегом может служить надежной основой при обосновании грузового средства док-кессона.

Опыт использования балластно-осушительной системы и конструктивных решений по изолированию кессонного пространства.

Одной из важнейших систем док-кессонов является балластная; она включает разветвленную сеть трубопроводов, задвижки и насосы [6]. Характерным признаком всех док-кессонов является наличие двух однотипных балластных насосов, каждый из которых в нормальных эксплуатационных условиях обслуживает одну из половин балластной системы [10]. При необходимости любой из насосов может быть подключён к смежной половине балластной системы. На всех док-кессонах предусмотрено дистанционное управление задвижками этой системы.

Насосы используются для откачки воды из балластных цистерн и из кессонного пространства за борт, для заполнения верхнего яруса балластных цистерн в башнях, а также перемещения воды из кессонного пространства в башни. Заполнение водой нижнего яруса балластных цистерн в башнях, а также цистерн в понтоне происходит самотёком.

На судах рассматриваемого типа балластная система определяет как основные параметры работы, так и саму возможность использования док-кессона.

В процессе эксплуатации док-кессонов в конструкцию балластной системы существенные изменения не вносились. На некоторых док-кессонах были заменены вышедшие из строя электромоторы привода балластных насосов и задвижек.

Управление системы на всех судах централизованное, дистанционное с пульта управления.

На большинстве судов, кроме проекта 2675, арматура системы установлена как в насосных отделениях, так и в балластных отсеках. Ремонт клинкет, расположенных в междудонном пространстве и других стеснённых отсеках, как отмечалось членами экипажей судов, связан с существенными неудобствами и сложностями. Кроме того, имели место случаи попадания в воду масла из гидравлической системы привода арматуры.

На док-кессоне проекта 2675 задвижки сосредоточены в насосных отделениях, привод их обеспечивается электромоторами. С точки зрения эксплуатации системы эти решения следует признать более удачными.

Для аварийного закрытия задвижек в случае отключения электроэнергии предусмотрен их ручной привод: на судах проекта 2675 - непосредственно в насосных отделениях, а на других судах - дистанционно с пульта управления, с помощью ручного насоса гидравлической системы.

Оригинальное конструктивное решение с использованием балластной системы осуществлено на док-кессоне проекта Р-101. С целью удаления из кессонного пространства битого льда от насосов балластной системы к отверстию во внутренней стенке поперечной башни подведены 2 трубопровода с установленными на них задвижками. В результате появилась возможность балластными насосами подавать в кессонное пространство на уровне плавающего льда мощные водяные струи. Таким образом, перед заводкой судна битый лёд вытесняется за пределы кессонного пространства.

На док-кессоне проекта 2675, выполняющем кессонирование крупных пассажирских судов, для удаления льда был изготовлен и оборудован плавающий потокообразователь. Он представляет собой винт, размещённый в короткой трубе и электропривод к нему. Поскольку потокообразователь забирал воду из кессонного пространства, при работе происходил её круговорот, вытеснение льда за пределы кессона добиться не удалось. Решение было признано неудачным.

На других док-кессонах лёд удаляется с помощью работающих винтов дополнительного судна - рейдового буксира или вручную.

В целом эксплуатация док-кессонов при отрицательной температуре усложняется, однако, как свидетельствует практика, по этой причине их работа не прекращалась.

Наряду с отмеченным, затруднение вызывает примерзание задвижек и образование ледяных «диафрагм» в трубопроводах балластной системы. На большинстве док-кессонов для предупреждения или устранения этого в балластный отсек подводится пар. Он подается в отсеки через трубы дыхательной системы или через люки; поступает пар с берега.

На док-кессоне проекта 2675 для прогрева балластной системы пользуются газорезательным аппаратом.

Рассматривая вопрос об устойчивости функционирования балластной системы при отрицательных температурах следует отметить, что она во многом зависит от опыта и ответственности экипажа. В этот период следует придерживаться определенной последовательности удаления воды из балластных отсеков при всплытии док-кессона, не допускать длительного пребывания док-кессона с малым погружением, сохранять воду в отсеках, где расположены задвижки.

Для док-кессонов, работающих при отрицательной температуре, не рекомендуется применение хрупкого металла для изготовления задвижек. Трубы балластной системы снабжаются компенсаторами.

В процессе эксплуатации док-кессонов проекта 2675 была изменена схема слива воды из верхнего яруса отсеков в башнях. Проектом слив был предусмотрен по трубопроводу, который использовался для подачи воды в отсеки, а при новой схеме слив ведется по специальным коротким трубопроводам, которые снабжены задвижками. Это позволяет ускорить процесс слива и, в случае кессонирования, заполнить водой кессонное пространство по окончании стапельных работ.

Для сбора воды со стапель-палубы на всех док-кессонах предусмотрены колодцы или ящики, из которых вода сбрасывается за борт. Представленные выше результаты эксплуатации балластной и осушительной системы представляют несомненный интерес с точки зрения проектирования нового док-кессона.

При проведении кессонирования обязательно применение шлюз-перегородки, которая размещается в оконечности стапель-палубы, в проеме между док-кессоном и поверхностью корпуса судна. Если док-кессон специализирован на кессонировании, а оконечности судов имеют заостренную форму, необходимость в дополнительных горизонтальных поперечных опорах отпадает, и они на стапель-палубе не устанавливаются. При этом улучшаются условия передвижения по стапель-палубе. Что касается киль-блоков, то при кессонировании они также применяются [9].

Рассмотрим конструкции шлюз-перегородок и особенности их использования.

Хронологически первым вариантом шлюз-перегородки на отечественных док-кессонах явилось полотнище из прорезиненной ткани. Оно выполнялось в форме прямоугольника. Одна из кромок полотнища герметично крепится к периметру поперечного сечения док-кессона, с помощью тросов полотнище перемещают по высоте. После поджатия док-кессона к оконечности судна натяжением тросов, полотнище прижимается к днищу и бортам шпилем и таким образом объем кессонного пространства изолируется от забортовой воды. Затем вода со стапель-палубы откачивается за борт и, частично, в башни.

Более сложный вариант шлюз-перегородки установлен в процессе эксплуатации док-кессона проекта 634А. Эта перегородка включает две основные части: жесткий блок и гибкое полотнище. Жесткий блок выполнен в виде u-образной плоской конструкции, верхняя кромка которой имеет очертание шпангоута кессонируемого судна. Этот блок размещен в щелевидном углублении в поперечной плоскости док-кессона и удерживается четырьмя вертикальными гидроцилиндрами снизу и одним горизонтальным гидроцилиндром с каждого борта. Такой гидравлический привод позволяет перемещать блок в прорези как по высоте, так и по ширине относительно док-кессона. Нижние гидроцилиндры размещены в специальных колодцах, которые

выступают ниже плоскости днища док-кессона. На внутренней боковой поверхности щелевидного углубления закреплена резиновая полоса, которая касается поверхности блока и служит для предотвращения поступления воды в кессонное пространство через щелевидное углубление.

Используется такая шлюз-перегородка следующим образом. После размещения оконечности судна в док-кессоне с помощью гидропривода жесткий блок поднимается снизу к корпусу. Затем натяжением тросов прижимается к поверхности днища и бортов гибкое полотнище. Кессонное пространство изолируется от заборной воды блоком и гибким полотнищем.

Практика свидетельствует, что шлюз-перегородки с использованием гибких полотнищ обладают рядом недостатков. Приведение полотнища в рабочее положение требует определенных навыков, так как невозможно визуально контролировать его положение в воде. Иногда приходится неоднократно подводить полотнище к поверхности корпуса, чтобы получить необходимую степень непроницаемости стыка между ними. Срок службы полотнища составляет 4...5 лет, его ремонт требует значительных затрат ручного труда.

Шлюз-перегородки с гибким полотнищем мало пригодны для работы при минусовой температуре воздуха. В этих условиях промерзают и теряют эластичность как полотнище, так и закрепленные на нём канаты.

На док-кессонах проектов 684 и 2675 используется третья разновидность шлюз-перегородок, жёсткая стенка, у которой верхняя кромка выполнена по форме посадочного шпангоута кессонируемого судна. Для обеспечения водонепроницаемости стыка поверхности судна со стенкой на верхней её кромке крепится заключенный в оболочку слой упругого материала, то есть резина, ветошь и так далее.

В док-кессоне проекта 2675 шлюз-перегородка комплектуется из четырех блоков, расположенных симметрично относительно диаметральной плоскости кессона. Док-кессон снабжён блоками для формирования шлюз-перегородок под все суда, которые предполагается кессонировать, каждая пара лекальных блоков образует форму только одного шпангоута, то есть пригодна для кессонирования одной оконечности судна.

Закладных блоков четыре: два блока для формирования шлюз-перегородок под носовые шпангоуты, два под кормовые. Все они имеют треугольную в плане форму но отличаются по размерам. Кормовые посадочные шпангоуты судов имеют ширину больше чем носовые и по этой причине при формировании под них шлюз-перегородок используют закладные блоки с меньшими размерами в плане.

Большой опыт применения жестких шлюз-перегородок при кессонировании пассажирских судов в док-кессоне проекта 2675 позволяет считать такую конструкцию достаточно эффективной. Вместе с тем следует провести поиск более эффективного уплотнения материала или конструкции между судном и кромкой шлюз-перегородки при проектировании док-кессона. Жесткая шлюз-перегородка представляется наилучшим вариантом.

Заключение

Многолетний опыт эксплуатации речных док-кессонов позволяет выявить, какие из конструктивно-архитектурных решений оказались более удачными с точки зрения эксплуатации. Анализируя собранную информацию можно сделать ряд выводов:

1) Наиболее распространенный тип док-кессона — с трапециевидной формой ступень-палубы. Это связано, в первую очередь, с большей площадью рабочего пространства, наименьшей трудоемкостью постройки и эксплуатации.

2) Корпус может быть с разнообразной системой набора, но наиболее часто используют следующую компоновку корпуса: понтон и башни имеют поперечную систему набора с рамной шпацией не более 1200мм. Превышение этого значения

может привести к перелому корпуса. Так же должен быть укреплен понтон в местах установки киль-блоков.

3) Грузовое устройство для установки на док-кессон не требуется, поскольку эксплуатация происходит на акватории судоремонтных предприятий, где имеется стационарное грузовое устройство.

4) Балластная система должна быть из морозостойкого материала, все ее элементы должны быть расположены в удобных для обслуживания местах. При отрицательных температурах воспользоваться паром, поступающим с берега или газорезательным аппаратом.

5) В качестве изолирующей конструкции наиболее эффективно показала себя жёсткая шлюз-перегородка, у которой верхняя кромка выполнена по форме посадочного шпангоута кессонируемого судна. Для обеспечения водонепроницаемости стыка поверхности судна со стенкой на верхней её кромке крепится заключенный в оболочку слой упругого материала, то есть резина или ветошь.

Литература

1. Семенов-Тянь-Шанский Р.В. Проектирование кессон-доков. – Судпромгиз, 1963. – 68 с.
2. Российский Речной Регистр. Правила классификации и освидетельствования плавучих объектов (ПКПО). Москва 2017. – 86 с.
3. Смирнов Е.Л. Речная справочная книжка корабельного инженера Е.Л. Смирнова.
4. Справочник по серийным транспортным судам. Том 6. – ЦБНТИ МРФ, – М.: Транспорт, 1977, 140 с.
5. К.Н. Чайников. Общее устройство судов. – Судостроение. 1971. – 208 с.
6. Ловягин М.А. Металлические плавучие доки. – Ленинград 1964. – 672 с.
7. Подъёмно-транспортное оборудование. Отраслевой каталог 18-4-87. Часть 1. Министерство тяжелого и транспортного машиностроения. 1987. – 162с.
8. Павлов П.Я. Рогулин А.Н. Эффективность эксплуатации доков. – М: Транспорт.1987 – 176 с.
9. Козляков В.В. Финкель Г.Н. Хархурим И.Я. Проектирование доковых опорных устройств. – Ленинград 1973. 391 с.
10. Niemi E., Fricke W., Maddox S.J. Structural Hot-spot Stress Approach to Fatigue Analysis of Welded Components. Designers' Guide. Int. Institute of Welding, IIW-Doc. XIII-WG3-31r1-14 Cambridge. Abington. 2015. P.49
11. Yogendra Parihal, S.K. Satsangi, A.R. Kar, "Application of direct hydrodynamic loads in structural analysis", International Conference on Computational and Experimental Marine Hydrodynamics MARHY 2014, 3-4 December 2014, Chennai, India.
12. 12.Transmitted by the European Commission [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.unecce.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2016/sc3wp3/ECE-TRANS-SC3-2016-inf02e.pdf/> (дата обращения 15.09.2020 г.)
13. Classification societies – what, why and how?, 2011 – 16 с. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: URL <http://www.iacs.org.uk/media/3785/iacs-class-what-why-how.pdf>. (дата обращения 15.09.2020 г.)
14. MARPOL 73/78 [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.imo.org/en/About/Pages/Default.aspx> (дата обращения 17.09.2020 г.)
15. DNVGL [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.dnvgl.com/maritime/service-overview/index.html> (дата обращения 19.09.2020 г.)

Reference

1. Semenov-Tyanshanskiy R.V. Caisson dock design. - Sudpromgiz, 1963 -- 68 p.
2. Russian River Register. Rules for the classification and survey of floating objects (ПКПО). Moscow 2017 -- 86 p.
3. Smirnov E.L. River reference book of ship engineer E.L. Smirnov.

4. Handbook of serial transport ships. Volume 6. - TsBNTI MRF, - M.: Transport, 1977, 140 p.
5. K.N. Dummies. General arrangement of ships. - Shipbuilding. 1971. - 208 p.
6. Lovyagin M.A. Metal floating docks. - Leningrad 1964. -- 672 p.
7. Hoisting and transport equipment. Industry catalog 18-4-87. Part 1. Ministry of Heavy and Transport Engineering. 1987. -- 162s.
8. Pavlov P.Ya. Rogulin A.N. Dock operation efficiency. - M: Transport. 1987 - 176 p.
9. Kozlyakov V.V. Finkel G.N. Kharkhurim I. Ya. Design of dock support devices. - Leningrad 1973.391 p.
10. Niemi E., Fricke W., Maddox S.J. Structural Hot-spot Stress Approach to Fatigue Analysis of Welded Components. Designers' Guide. Int. Institute of Welding, IIW-Doc. XIII-WG3-31r1-14 Cambridge. Abington. 2015. P.49
11. Yogendra Parihal, S.K. Satsangi, A.R. Kar, "Application of direct hydrodynamic loads in structural analysis", International Conference on Computational and Experimental Marine Hydrodynamics MARHY 2014, 3-4 December 2014, Chennai, India.
12. Transmitted by the European Commission [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.unesco.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2016/sc3wp3/ECE-TRANS-SC3-2016-inf02e.pdf> (дата обращения 15.09.2020 г.)
13. Classification societies – what, why and how?, 2011 – 16 с. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: URL <http://www.iacs.org.uk/media/3785/iacs-class-what-why-how.pdf>. (дата обращения 15.09.2020 г.)
14. MARPOL 73/78 [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.imo.org/en/About/Pages/Default.aspx> (дата обращения 17.09.2020 г.)
15. DNVGL [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.dnvgl.com/maritime/service-overview/index.html> (дата обращения 19.09.2020 г.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Шалак Сергей Евгеньевич, магистрант кафедры «Проектирования и технологии постройки судов», Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kaf_ptps@vsuwt.ru

Sergey E. Shalak, student of the Department of «Design and shipbuilding technology», Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Кеслер Анатолий Александрович, к.т.н., доцент, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kaf_ptps@vsuwt.ru

Anatoly A. Kesler, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Volga State University of Water Transport (VSUWT), 5, Nesterova street, Nizhny Novgorod, Russia, 603950

Статья поступила в редакцию 21.12.2021; опубликована онлайн 23.03.2021.
Received 21.12.2021; published online 23.03.2021.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ СУДОВОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

УДК 62-843.3

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi66.147>

Моделирование рабочего процесса, организованного по глубокому циклу Миллера в судовом двухтопливном дизеле

Д.С. Ватолин

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8692-6829>

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

Аннотация. В статье рассмотрены экологические и экономические предпосылки широкого распространения двухтопливных дизельных двигателей на мировом флоте. Произведен краткий обзор циклов, применяемых в судовых двухтопливных дизелях. Рассмотрены также перспективы и проблемы их дальнейшего развития. В основу статьи положено исследование возможного увеличения детонационной стойкости двухтопливных дизелей за счет применения глубокого цикла Миллера. Исследование проводилось с помощью программного обеспечения ведущей компании в области проектирования и двигателестроения AVL List GmbH. В качестве прототипа был принят серийный судовой двигатель MAN 8L51/60DF, а в основу модели заложены данные, полученные в течение трех лет его эксплуатации.

Ключевые слова: усиленный цикл Миллера, ДВС, двухтопливный дизельный двигатель, изменяемые фазы газораспределения, двухступенчатый турбонаддув.

Modeling of the operating process in relation to deep Miller cycle in a ship's dual-fuel diesel engine

Dmitriy S. Vatolin

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8692-6829>

Admiral Makarov State University of maritime and inland shipping, St.-Petersburg, Russian Federation

Abstract. This article considers environmental and economic prerequisites for the widespread use of dual-fuel diesel engines in the world fleet. A brief overview of the existing cycles used in ship's dual-fuel diesel engines was provided. The prospects and problems of their further development were also considered. The basis of the article is the study of a possible increase in the detonation resistance of dual-fuel diesels by using deep Miller cycle. The research was conducted by using the software of the leading company in the field of design and engine building AVL List GmbH. As a prototype, the serial marine engine MAN 8L51/60DF was taken, and the model was based on the data obtained during three years of its operation.

Keywords: enhanced Miller cycle, ICE, dual-fuel diesel engine, variable valve timing, two-stage turbocharging.

Введение

В последнее время всё большее распространение на мировом морском флоте получают двухтопливные дизельные двигатели (Dual Fuel Diesel Engine - DFDE), способные работать на природном газе с использованием малой дозы запального жидкого топлива. Основными причинами роста спроса на DFDE стали относительно низкая стоимость СПГ (сжиженный природный газ) и всё более высокие требования к экологичности двигателей [1]. Высокие требования вступивших в силу новых экономических норм вынуждают производителей двигателей уменьшать долю запального топлива относительно общего тепловыделения в рабочих цилиндрах двигателя (на данный момент она составляет ~1% на номинальной нагрузке), из-за чего страдает стабильность рабочего процесса.

Для увеличения стабильности рабочего процесса DFDE при работе на природном газе ведущие мировые производители судовых двигателей, такие как MAN Diesel & Turbo SE и Wartsila, активно разрабатывали концепцию, в которой четырехтактный двухтопливный двигатель приводил в действие генератор переменного тока, входящий в систему электродвижения судна. Газ в двигателе данного типа подается в цилиндр через впускные клапана вместе с продувочным воздухом во время такта наполнения цилиндра, метано-воздушная смесь сжимается и воспламеняется пилотным топливом (см. рис. 1).

Такой подход давал некоторые преимущества в организации рабочего процесса: постоянная частота вращения двигателя гарантировала постоянство коэффициентов продувки цилиндра и остаточных газов, что способствовало поддержанию оптимального коэффициента избытка воздуха $\lambda \approx 2,2$ (см. рис. 2), что создавало определенный запас по детонации у DFDE.

Однако подобный подход имеет и ощутимый недостаток в виде больших потерь энергии в системе электродвижения.

В 2015 году компания Winterthur Gas & Diesel Ltd. (WinGD) начала разработки по созданию двухтактного сверхдлинноходового двухтопливного двигателя, способного работать на вент фиксированного шага (ВФШ) и уже в 2017 году создала и запустила в серийное производство двигатели серии X-DF.

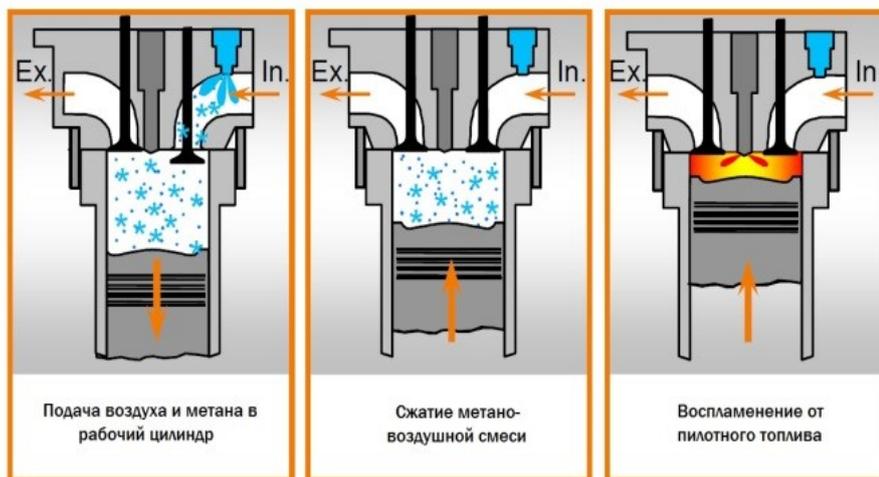


Рис. 1. Рабочий процесс 4-тактного DFDE

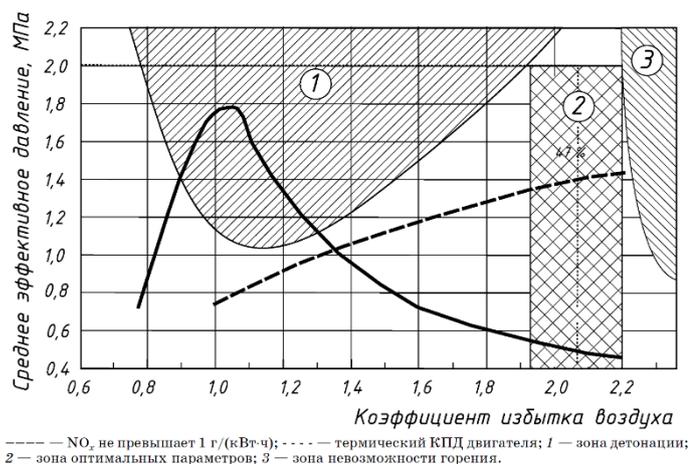


Рис. 2. Характер протекания рабочего процесса газового двигателя, работающего по циклу Отто, в зависимости от коэффициента избытка воздуха (по материалам фирмы Wärtsilä)

У данного типа двигателей клапана подачи газа в цилиндр находятся чуть выше продувочных окон втулки. По окончании такта продувки и наполнения, газ подается в цилиндр, метано-воздушная смесь сжимается и воспламеняется пилотным топливом (см. рис. 3).

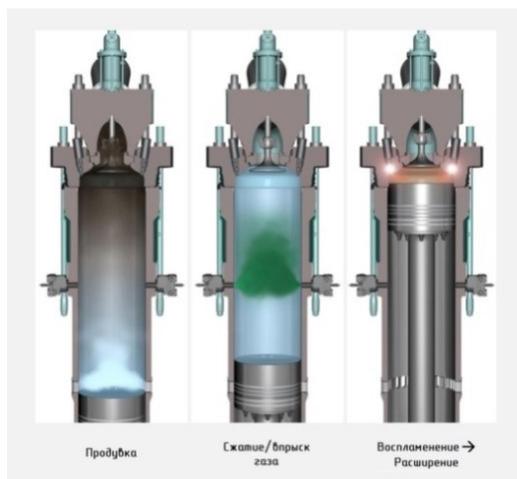


Рис. 3. Рабочий процесс 2-тактного DFDE

Организация рабочего процесса подобным образом имеет сразу несколько преимуществ: газ подается в цилиндр под относительно невысоким давлением (в зависимости от типа системы подачи газа от 10 до 16 бар) и у метано-воздушной смеси есть достаточное количество времени, чтобы стать более однородной. Однако, существенным недостатком двигателя является его неспособность работать на газовом топливе в широком диапазоне нагрузок. Данный газодизель способен устойчиво работать в газовом режиме только при движении вперед и при мощности не ниже 50% от CMCR (Contract Maximum Continuous Rating – установленная максимальная длительная нагрузка) [2]. Следовательно, во время маневров и морских переходов «экономным ходом» придется использовать жидкое топливо.

Всё вышеперечисленное указывает на то, что экономические условия и экологические нормы требуют создания судового двухтопливного дизельного двигателя, способного работать на ВФШ в широком диапазоне нагрузок.

Анализ необходимых к принятию мер для организации работы двухтопливного двигателя на ВФШ

При заданной рабочей точке (воздушно-топливное соотношение при сгорании $\lambda_v=const$; температура наддувочного воздуха $T_{Rec}=const$) и фиксированных фазах газораспределения (массовый коэффициент избытка воздуха $\lambda_R=const$), мощность двигателя P_e прямо пропорциональна давлению наддува P_{Rec} (1, 2) [3]. Для большего удобства дальнейшего изложения, уравнения составлены для среднего эффективного давления P_{me} , т.к. мощность двигателя P_e ему прямо пропорциональна:

$$P_e = \frac{P_{Rec} \cdot \lambda_R \cdot H_u \cdot \eta_{th}}{(\lambda_v \cdot L_{min}=1) \cdot T_{Rec} \cdot R_{Rec}} \tag{1}$$

$$P_e \propto P_{Rec} \tag{2}$$

где H_u – теплота сгорания топлива (для природного газа =49,67 МДж/кг); L_{min} – масса воздуха, теоретически необходимая для сгорания 1 кг топлива (для природного газа =12,3 кг); $R_{Rec}=0,287$ кДж/(кг·К) – газовая постоянная; η_{th} – термический КПД двигателя.

У судовых четырехтактных двухтопливных дизелей с внешним смесеобразованием газ подается непосредственно к впускным клапанам по специальному каналу и попадает в цилиндр вместе с продувочным воздухом. Коэффициент избытка воздуха выдерживается в диапазоне, гарантирующем бездетонационную работу двигателя с одной стороны и отсутствие пропусков с другой. Мощность двигателя зависит от количества топливо-воздушной смеси, оказавшейся в цилиндре к моменту закрытия органов газораспределения. Во избежание потерь топливо-воздушной смеси, фазы газораспределения настраиваются таким образом, чтобы коэффициент использования продувочного воздуха держался на уровне 99% [3]. Существующие четырехтактные двухтопливные дизельные двигатели работают по умеренному циклу Миллера с фиксированными фазами газораспределения, поэтому коэффициент наполнения λ_l определяется параметрами установившегося режима работы двигателя и зависит, главным образом, от значений массового расхода заряда воздуха и частоты вращения двигателя n_{Eng} .

Двухтактные дизеля в этом плане значительно уступают четырехтактным, т.к. по мере уменьшения мощности двигателя и, как следствие, снижения давления наддува ухудшается продувка цилиндра и возрастает значение коэффициента остаточных газов. В таких условиях работы выдерживать оптимальное значение коэффициента избытка воздуха становится значительно сложнее.

Более устойчивые газодинамические показатели рабочего процесса и перспективные разработки в области изменяемых фаз газораспределения делают четырехтактные двухтопливные дизеля наиболее перспективными в плане реализации работы на ВФШ во всем диапазоне нагрузок.

Воздушно-топливное отношение при сгорании λ_v прямо пропорционально массовому коэффициенту избытка воздуха λ_R (3, 4):

$$\lambda_v = \frac{P_{Rec} \cdot \lambda_R \cdot H_u \cdot \eta_{th}}{L_{min} \cdot P_{me} \cdot T_{Rec} \cdot R_{Rec}} - \frac{1}{L_{min}} \tag{3}$$

$$\lambda_v \propto P_{Rec} \cdot \lambda_R \tag{4}$$

Однако при использовании системы с изменяемыми фазами газораспределения, количество газа, подаваемого в цилиндр, может быть отрегулировано соответствующей настройкой угла открытия и/или ходом впускных клапанов. Как следствие, массовый коэффициент избытка продувочного воздуха λ_R может быть отрегулирован под каждое значение мощности двигателя (см. рис. 4).

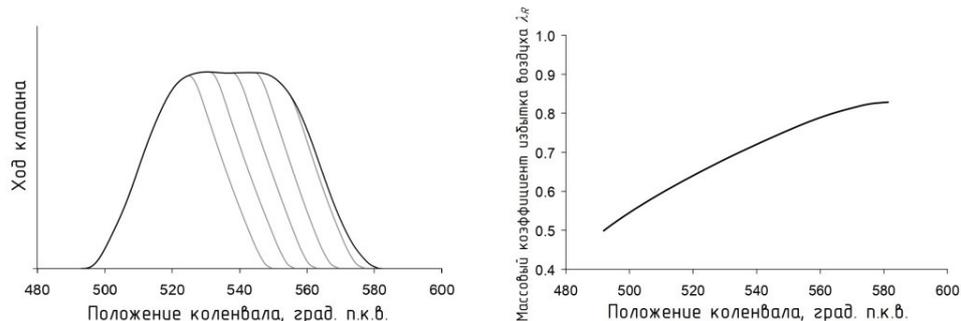


Рис. 4. Зависимость массового коэффициента избытка продувочного воздуха λ_R от изменения угла закрытия впускных клапанов [3]

С другой стороны, подобное решение влечет за собой соответствующие проблемы: закрытие впускного клапана происходит значительно быстрее, чем в умеренном цикле Миллера, что увеличивает снижение давления наддувочного воздуха при продувке цилиндра. Низкое давление воздуха в цилиндре в начале такта сжатия может отрицательно сказываться на расходе топлива.

Для решения этой проблемы приходится применять турбонаддув с более высокой степенью повышения давления (от 6 до 12), для более быстрого наполнения цилиндра. На рис. 5 показана зависимость необходимой степени повышения давления в ТК от времени закрытия впускного клапана [4].

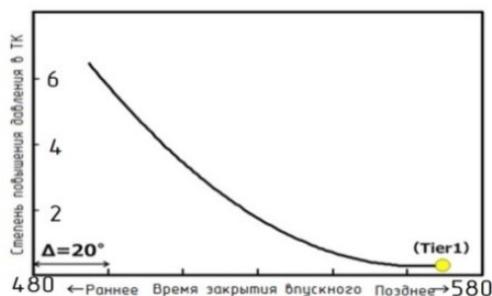


Рис. 5. Зависимость необходимой степени повышения давления в ТК от времени закрытия впускного клапана [4]

При организации двухступенчатого турбонаддува необходимо учитывать, что осуществлять регулирование объемного расхода воздуха необходимо в довольно большом диапазоне, чтобы позволить двигателю работать в широком диапазоне долевых нагрузок. Возможные варианты организации системы наддува представлены на рис. 6.

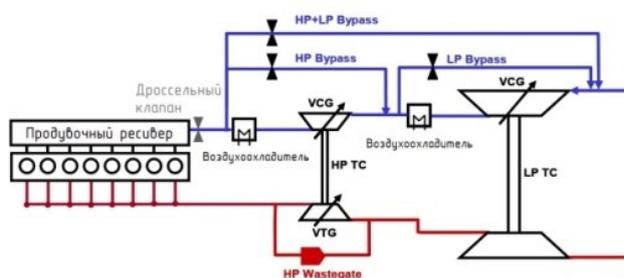


Рис. 6. Схемы организации двухступенчатого турбонаддува

Основываясь на вышеизложенном, можно заключить, что организация рабочего процесса DFDE на ВФШ требует всесторонней проработки и моделирования переходных рабочих процессов с целью определения границ начала детонации газа в цилиндре и методов недопущения их образования. Основной задачей дальнейшего исследования следует считать разработку методов повышения устойчивости рабочего процесса DFDE.

Моделирование рабочих процессов двигателя прототипа

В качестве двигателя-прототипа для проведения компьютерного моделирования рабочих процессов DFDE был выбран судовой двухтопливный дизельный двигатель MAN 8L51/60DF (рис. 7), который полностью удовлетворяет требованиям Международной Ассоциации Классификационных Обществ (International Association Classification Societies - IACS), а так же IGF (IMO Convention "International Gas-Fuelled Ships Code" (interim guidelines of safety for natural gas-fuelled engine installations, IMO Resolution MSC. 285(86))) - [5] и IGC (IMO Convention "International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk") Code [6].



Рис. 7. Общий вид двигателя MAN 8L51/60DF [7]

Основные характеристики двигателя: диаметр цилиндра – 510 мм, ход поршня – 600 мм, частота вращения коленчатого вала – 514 об/мин, номинальная мощность – 8МВт, среднее эффективное давление – 19,0 бар, степень сжатия – 13,3 [7].

Двигатели данного типа установлены на LNG-танкере «Castillo de Santisteban» для работы на генератор переменного тока в составе системы электродвижения судна.

Для проведения более корректного моделирования с высоким уровнем валидации результатов требуются программные комплексы, способные интегрировать результаты термодинамического расчета двигателя в CFD-модель. Программные комплексы компании AVL List GmbH BOOST™ и FIRE™ позволяют выполнить данную интеграцию [8].

В программном комплексе BOOST™ была собрана модель (рис. 8), состоящая из основных элементов моделируемого двигателя, и каждому элементу были присвоены характеристики его реального прототипа. Основные характеристики органов газораспределения (диаметр впускных/выпускных клапанов, время и величина их открытия, время закрытия, профиль кулака распредвала и т.д.) были так же сняты с реального прототипа.

По причине отсутствия у данного двигателя системы индикации рабочего процесса, для получения исходных данных для моделирования были обработаны эксплуатационные параметры дизеля за почти трехлетний период эксплуатации и полученные данные были соотнесены с данными стендовых испытаний (в протоколе которых зафиксированы максимальные давления сгорания топлива P_{max}).

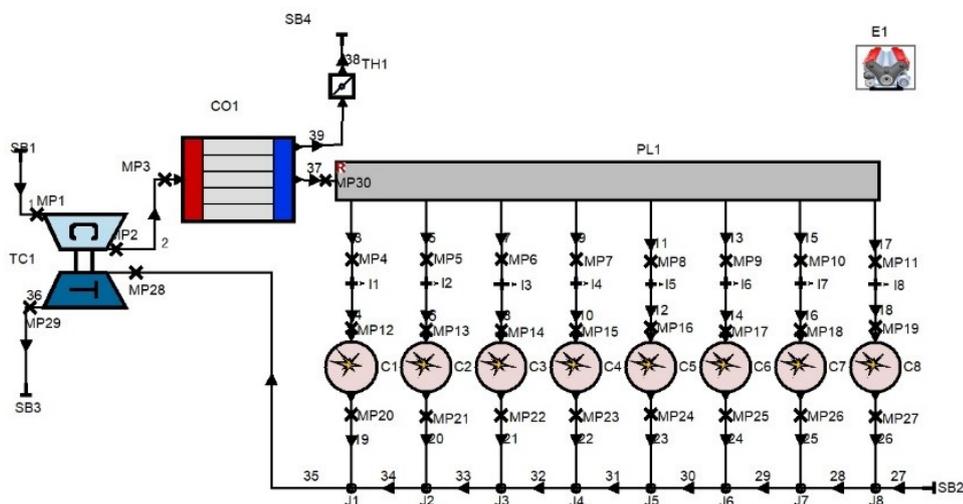


Рис. 8. Модель двигателя MAN 8L51/60DF выполненная в BOOST™

В результате анализа данных было определено, что наибольшей схожимостью при эксплуатации и при испытаниях на стенде обладают значения, полученные при нагрузке 75% от номинальной P_e . (результаты укладываются в доверительную вероятность 95%). Данные стендовых испытаний на номинальной мощности P_e являются единственными достоверно известными, т.к. двигатель в эксплуатации на такую нагрузку никогда не выводился. Закон тепловыделения был определен полуэмпирическим путем по методу Вибе [9] и представлен на рис. 9.

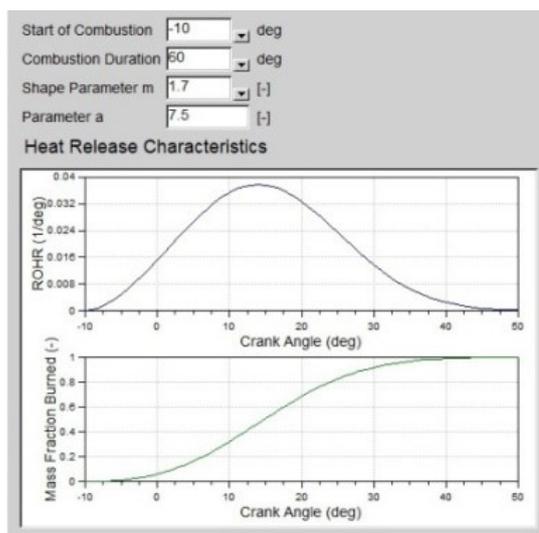


Рис. 9. Закон тепловыделения

Таблица 1

Анализ результатов моделирования

Нагрузка Параметр	100%		75%	
	Результат моделирования	Отклонение от прототипа, %	Результат моделирования	Отклонение от прототипа, %
Эффективная мощность, кВт	8126,07	-1,57	5867,15	2,21
Среднее по цилиндрам максимальное давление сгорания, барА	155,8	-0,82	116,75	4,81
Давление воздуха в продувочном ресивере, барА	4,1631	-0,034	3,1178	-5,41
Температура воздуха в продувочном ресивере, °К	321,64	-8,23	319,83	-7,8
Среднее эффективное давление, барА	19,3476	3,43	13,9693	9,3
Температура ОГ перед ТК, °К	806,8	-6,09	799,2	-2,74
Часовой расход топлива, кг/час	1357,07	3,68	1028,5	3,8

На рис. 10 представлены индикаторная диаграмма, полученная при моделировании двигателя на номинальной нагрузке и индикаторные диаграммы, снятые с двигателя-прототипа при нагрузке ~90%.

Полученная индикаторная диаграмма имеет идентичный профиль с диаграммами, снятыми с двигателя-прототипа, что подтверждает соблюдение закона тепловыделения в рабочем цилиндре.

Коэффициент избытка воздуха выдерживается в диапазоне ~2,2, что соответствует оптимуму и обеспечивает бездетонационную работу двигателя.

Отклонение основных параметров, при проведении моделирования не превышает 10%, что позволяет признать точность модели удовлетворительной.

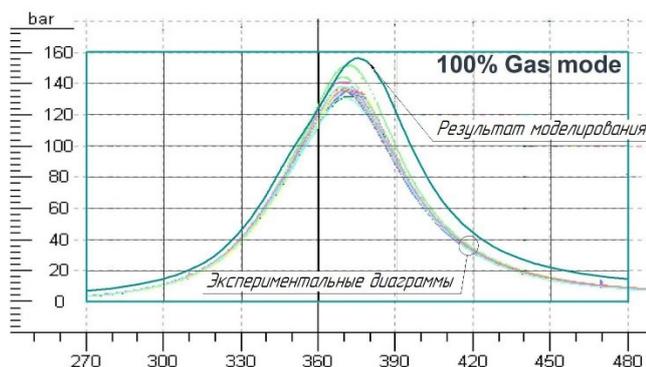


Рис. 10. Индикаторные диаграммы

Применение двухступенчатого наддува

Далее на основе полученной модели была построена модель двигателя с двухступенчатой системой наддува (рис. 11). В модель были заложены характеристики турбокомпрессоров MAN TCA55 [10] и TCX17 [11], что позволило получить общую степень повышения давления 10,45.

В модели был реализован глубокий цикл Миллера с ранним закрытием впускного клапана (IVC) – 325-450° п.к.в для $P_e=100\%$, 325-433° п.к.в для $P_e=75\%$.

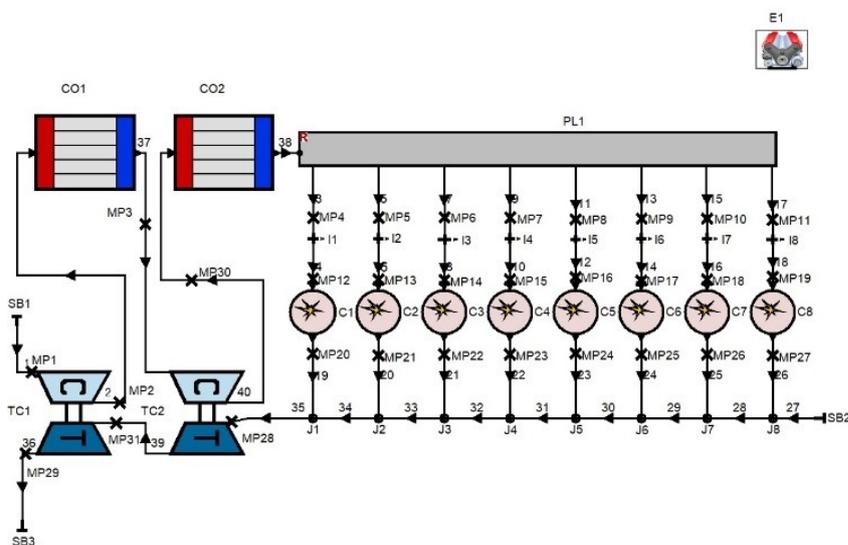


Рис. 11. Модель двигателя MAN 8L51/60DF с двухступенчатой системой наддува

В результате при достижении первоначальной номинальной мощности P_e максимальное давление цикла P_{max} снизилось на ~12%, а при достижении номинального P_{max} мощность двигателя P_e увеличилась на ~20%. Стоит отметить, что при аналогичном исследовании на реальном двигателе [12], было отмечено повышение мощности всего на 13-15%. Данный факт объясняется меньшей степенью повышения давления у экспериментального двигателя (~10) и недостаточной точностью модели, вызванной нехваткой исходных данных.

Результаты изменения длительности открытия впускного клапана представлены на рис. 12.

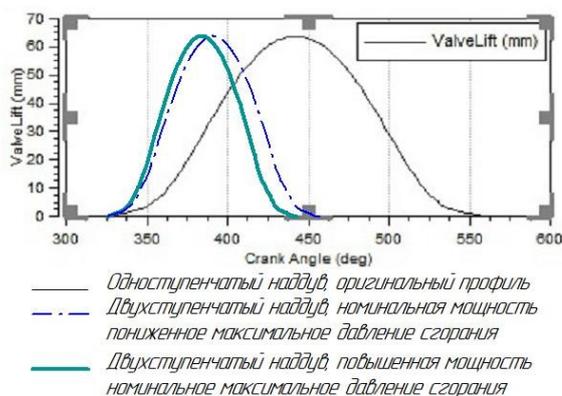


Рис. 12. Диаграмма угол-сечение впускного клапана

На следующем этапе моделирования полученные данные были интегрированы в заранее созданную объемную модель рабочего цилиндра в AVL FIRE™. Созданная подвижная расчетная сетка (рис. 13) полностью соответствующая рабочему объему цилиндра без учета открытия/закрытия впускных и выпускных клапанов.

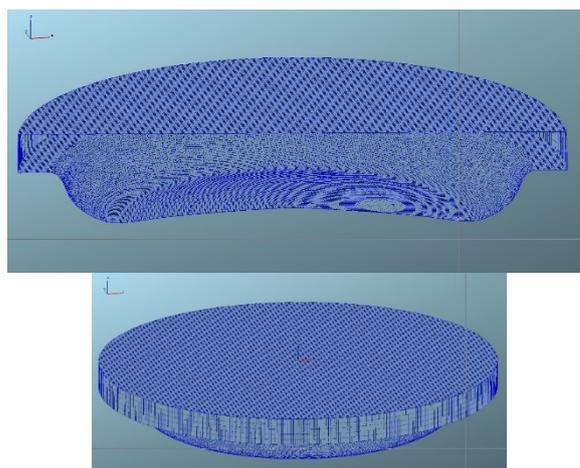


Рис. 13. Расчетная сетка, соответствующая объему камеры сгорания цилиндра

Турбулентный режим горения предварительно смешанной смеси может быть задан с использованием различных свойств, таких как химическая шкала времени, интегральная шкала длин и интенсивность турбулентности. Из-за предположения, что во многих устройствах сгорания (например, поршневые двигатели внутреннего сгорания) химические временные шкалы намного меньше по сравнению с турбулентными, может применяться дополнительная концепция сгорания: модель когерентного сгорания или CFM (Coherent Flame Model) [8]. CFM применима как к предварительно смешанным, так и к предварительно не смешанному топливу и воздуху на основе концепции ламинарного пламени, где скорость S_L и толщина δ_L представляют собой средние значения, интегрированные вдоль фронта пламени, зависящие только от давления, температуры и обогащения смеси. Такая модель довольно привлекательна, поскольку химические взаимодействия и турбулентность потока рассматриваются отдельно. Все модели сгорания предполагают, что реакция происходит в относительных тонких слоях, которые разделяют, свежую смесь от

полностью сгоревшего газа. Используя это предположение, средняя скорость турбулентной реакции рассчитывается как произведение плотности поверхности пламени и ламинарной скорости горения.

В качестве модели воспламенения использовалась ECFM – Diesel ignited gas engine. Для определения детонации используется функция AVL VisioKnock Technology [8], которая просчитывает вероятность начала детонационного сгорания. Т.к. процесс детонации в двухтопливном двигателе значительно отличается от детонации в газовом двигателе с искровым зажиганием (при детонационном сгорании в ДД отмечаются «металлические шумы», которые сдвигают образующийся звуковой сигнал в другой частотный диапазон), для математического моделирования неконтролируемого сгорания топлива в газодизеле разрабатываются специальные феноменологические модели.

Задержка самовоспламенения несгоревшего газа τ_{Knock} , согласно уравнению (5) зависит от давления в цилиндре, температуры топливо-воздушной смеси, соотношения топливо/воздух и композиции рабочей смеси ($X_1...X_3$ – коэффициенты, учитывающие все эти факторы) [3].

$$\tau_{Knock} = X_1 \cdot p^{-X_2} \cdot e^{X_3/I} \quad (5)$$

Композиция топливо-воздушной смеси в цилиндре постоянно меняется, ввиду чего представленное выше уравнение должно интегрироваться по времени. Предполагается, что самовоспламенение происходит, когда значение интеграла в уравнении (6) превысит определенный уровень, обычно определяемый по результатам измерений (его можно также вычислить теоретически) [3]:

$$I_{Knock} = \int_{t_{IVC}}^{t_{end\ of\ combustion}} \frac{1}{\tau_{Knock}} dt \quad (6)$$

На данный момент ведется работа по определению критериев допустимого уровня детонаций, с целью задания граничных условий для расчета переходных режимов работы двигателя.

В результате многочисленных симуляций рабочего процесса с использованием различных значений наполнения цилиндра воздухом и коэффициентов избытка воздуха была получена карта допустимых пределов эксплуатации (рис. 14). Границы эксплуатации определены, с одной стороны, началом детонационного сгорания, с другой – началом пропусков вспышек.

Как видно из полученных данных, применение глубокого цикла Миллера значительно расширило диапазон бездетонационной работы двигателя (на рис. 14 пунктирной линией обозначена эксплуатационная карта для двигателя с одноступенчатым наддувом), т.к. раннее закрытие впускного клапана и продолжающееся движение поршня к нижней мертвой точке (НМТ) реализуют дополнительное охлаждение топливо-воздушной смеси. Более низкие значения температуры и давления рабочей смеси в начале цикла обеспечивают более низкие пиковые значения при сгорании топлива, что положительно сказывается на тепловой нагрузке цилиндра. Так же, более низкие пиковые параметры цикла способствуют уменьшению количества образующихся оксидов азота.

Столь широкий эксплуатационный диапазон в сочетании с современными системами контроля рабочего процесса (например, как описанные в [3] и [13]) способен обеспечить устойчивую работу двигателя во всем диапазоне нагрузок, в том числе и при работе по винтовой характеристике.

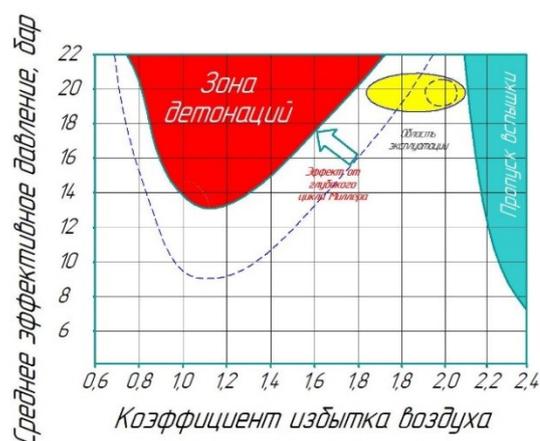


Рис. 14. Диапазон эксплуатации двухтопливного дизельного двигателя

Заключение

Современные экологические и экономические требования ставят перед производителями двигателей все более и более сложные задачи. Необходимость обеспечения работы двухтопливного дизеля на ВФШ является одной из них.

Неравномерность частоты вращения коленчатого вала, быстрое изменение заряда воздуха в цилиндре, продолжительная работа двигателя при повышенных упоре и моменте являются наиболее существенными причинами появления детонационного сгорания топлива. Как показано в настоящем исследовании, реализация глубокого цикла Миллера в сочетании с современными системами контроля рабочего процесса способны обеспечить широкий рабочий диапазон для двухтопливного дизеля, т.к. дополнительное охлаждение топливо-воздушной смеси снижает тепловую нагрузку на рабочий цилиндр, уменьшая вероятность перегрева его элементов, а быстрое и адекватное регулирование рабочих процессов позволит удержать коэффициент избытка воздуха в диапазоне приемлемом для нормальной работы двигателя.

Нет сомнений в том, что тот производитель двигателей, который сможет воплотить данные технологии в реальный дизель, займет доминирующее положение на мировом рынке на довольно длительный срок.

Литература

1. Nitrogen Oxides (NOx) – Regulation 13. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx) (дата обращения 27.02.2020).
2. X52DF. Operation Manual. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.wingd.com/en/documents/x52df/engine-operation/operation-manual-\(om\)/](https://www.wingd.com/en/documents/x52df/engine-operation/operation-manual-(om)/) (дата обращения: 06.01.2020).
3. Engine Control and Performance Enhancement with Variable Valve Train for Gas Engines. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://pdfs.semanticscholar.org/d4e6/cb1635ae1befac0ef9f49199f8c328959277.pdf?_ga=2.241939713.245192598.1582797933-333298755.1582797933 (дата обращения: 27.02.2020).
4. Two-stage Turbocharging for Four-Stroke Medium-Speed Diesel Engines. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.yanmar.com/sg/technology/technical_review/2016/0727_3.html (дата обращения 02.06.2019).
5. IMO Convention “International Gas-Fuelled Ships Code“ (interim guidelines of safety for natural gas-fuelled engine installations, IMO Resolution MSC. 285(86)). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.iacs.org.uk/download/3966> (дата обращения 27.01.2020).

6. IMO Convention "International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk". [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.imo.org/en/Publications/Documents/Supplements%20and%20CDs/English/IGC_2003sup.pdf (дата обращения 27.01.2020).
7. MAN L51/60DF Diesel Electric Propulsion. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://marine.man-es.com/docs/default-source/shopwaredocuments/man-l51-60df8f6b0c494739478a818ef2765bdbaa92.pdf?sfvrsn=3a524b51_6 (дата обращения: 27.02.2020).
8. FIRETM. Users Manual Version 2017. AVL List GmbH Graz, Austria, 2017. (License Agreement for Use of the Simulation Software AVL FIRETM between Admiral Makarov SUMIS and AVL List GmbH, 2019).
9. Вибье И. И. Новое о рабочем цикле двигателей / И. И. Вибье – М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы. – 1962. – 273с.
10. TCA Turbocharger. The Benchmark. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://turbocharger.man-es.com/docs/default-source/shopwaredocuments/tca-turbochargerf451d068cde04720bdc9b8e95b7c0f8e.pdf?sfvrsn=81b197c6_3 (дата обращения 29.01.2020).
11. TCX. Exponential turbocharging. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://turbocharger.man-es.com/docs/default-source/shopwaredocuments/tcx.pdf?sfvrsn=865b2e42_3 дата обращения: (27.02.2020).
12. Vaarasto M. Experience of 2-stage turbocharged engines / M. Vaarasto, B. Hallback, D. Delneri, T. Raikio // CIMAC Congress, Helsinki. – 2016. – Paper №191. – 10 p.
13. Millo F. Knock in dual fuel engines: A comparison between different techniques for detection and control / F. Millo, G. Lavarino, A. Cafari // CIMAC Congress, Bergen. – 2010. – Paper No. 312. – 15 p.UDC 62-843.3

References:

1. Nitrogen Oxides (NO_x) – Regulation 13 – [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx)
2. X52DF. Operation Manual. – [https://www.wingd.com/en/documents/x52df/engine-operation/operation-manual-\(om\)/](https://www.wingd.com/en/documents/x52df/engine-operation/operation-manual-(om)/)
3. Engine Control and Performance Enhancement with Variable Valve Train for Gas Engines. – https://pdfs.semanticscholar.org/d4e6/cb1635ae1befac0ef9f49199f8c328959277.pdf?_ga=2.241939713.245192598.1582797933-333298755.1582797933
4. Two-stage Turbocharging for Four-Stroke Medium-Speed Diesel Engines. – https://www.yanmar.com/sg/technology/technical_review/2016/0727_3.html
5. IMO Convention “International Gas-Fuelled Ships Code” (interim guidelines of safety for natural gas-fuelled engine installations, IMO Resolution MSC. 285(86)). – <http://www.iaacs.org.uk/download/3966>
6. IMO Convention "International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk". – http://www.imo.org/en/Publications/Documents/Supplements%20and%20CDs/English/IGC_2003sup.pdf
7. MAN L51/60DF Diesel Electric Propulsion. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://marine.man-es.com/docs/default-source/shopwaredocuments/man-l51-60df8f6b0c494739478a818ef2765bdbaa92.pdf?sfvrsn=3a524b51_6 (дата обращения: 27.02.2020).
8. FIRETM. Users Manual Version 2017. AVL List GmbH Graz, Austria, 2017. (License Agreement for Use of the Simulation Software AVL FIRETM between Admiral Makarov SUMIS and AVL List GmbH, 2019).
9. *Vibe I.I.* New about the working cycle of. - М.: State Scientific and Technical Publishing House of Engineering Literature. - 1962. – 273p.
10. TCA Turbocharger. The Benchmark. – https://turbocharger.man-es.com/docs/default-source/shopwaredocuments/tca-turbochargerf451d068cde04720bdc9b8e95b7c0f8e.pdf?sfvrsn=81b197c6_3

11. TCX. Exponential turbocharging. – https://turbocharger.man-es.com/docs/default-source/shopwaredocuments/tcx.pdf?sfvrsn=865b2e42_3
12. Vaarasto M. Experience of 2-stage turbocharged engines. M. Vaarasto, B. Hallback, D. Delneri, T.Raikio. - CIMAC Congress, Helsinki. – 2016. – Paper №191. – 10 p.
13. Millo F. Knock in dual fuel engines: A comparison between different techniques for detection and control. F. Millo, G. Lavarino, A. Cafari. - CIMAC Congress, Bergen. – 2010. – Paper No. 312. – 15p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ватолин Дмитрий Сергеевич, аспирант кафедры Двигателей внутреннего сгорания и автоматики судовых энергетических установок, Государственный университет морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская 5/7, e-mail: vatolinds@gumrf.ru

Dmitrii S. Vatolin, graduate student of the Department of Internal combustion engines and marine power plant automatization, Admiral Makarov State university of maritime and inland shipping, Dvinskaya 5/7, St. Petersburg, 198035, Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 30.10.2020; опубликована онлайн 23.03.2021.
Received 30.10.2020; published online 23.03.2021.

УДК 629.124

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi66.156>

Перспективы и проблемы использования сжиженного природного газа в качестве топлива на речных судах в северных парокходствах России

Л.В. Иванов¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6916-7154>

А.В. Соловьёв²

Э.Г. Румянцев²

¹*Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия*

²*Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия*

Аннотация. В статье рассматриваются перспективы модернизации судов, эксплуатируемых в акваториях магистральных сибирских рек, под использование сжиженного природного газа (СПГ) как основного типа топлива, а также проблемы, связанные с их адаптацией. СПГ является дешевым, энергетически эффективным и более экологически чистым аналогом традиционного дизельного топлива (ДТ). Унификация проектов адаптации распространенных типов главных двигателей судов из северных парокходств позволит значительно снизить эксплуатационные затраты. Проблемы модернизации связаны с хранилищем запаса топлива на судах. Более низкая плотность СПГ по сравнению с ДТ, а также необходимость использования криогенного топливного танка, снижает автономность эксплуатации судна на СПГ. Выполненный в статье анализ показал, что при модернизации автономность плавания по запасам топлива может снизиться в два раза.

Ключевые слова: газомоторное топливо (ГМТ), СПГ, танки типа С, газодизель, двухтопливные судовые двигатели, автономность плавания.

Prospects and problems of using liquefied natural gas as fuel on river vessels in the northern shipping companies of Russia

Lev V. Ivanov¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6916-7154>

Alexey V. Soloviev²

Ernest G. Rumiantcev²

¹*ITMO University, Saint Petersburg, Russia*

²*Volga state University of water transport, Nizhny Novgorod, Russia*

Abstract. The article considers the prospects of the modernization of vessels operating in the water areas of the main Siberian rivers, for the use of liquefied natural gas (LNG) as the main type of fuel, as well as problems associated with the adaptation of the existing ship designs. LNG is a cheap, energy efficient, and more environmentally friendly analogue of the traditional diesel fuel (DF). Unification of adaptation projects for common types of main engines of ships from northern shipping companies will significantly reduce operating costs. Modernization problems are associated with the storage of fuel stock on ships. The lower density of LNG in comparison with diesel fuel, as well as the need to use a cryogenic fuel tank, reduces the autonomy of the ship's operation on LNG. The analysis carried out in the

article showed that with modernization, the autonomy of navigation in terms of fuel reserves can be halved.

Keywords: gas engine fuel, LNG, type C tanks, gas diesel, dual fuel marine engines, fuel autonomy.

Введение

В настоящее время все чаще встает вопрос об использовании газомоторного топлива (ГМТ) на судах. ГМТ дешевле и экологичнее, чем традиционно применяемое ДТ. Уже существуют проекты судов, использующих в качестве основного топлива компримированный природный газ (КПГ) и сжиженный углеводородный газ (СУГ). СУГ не прижился на судовых ДВС из-за нестабильного горения при высоких степенях сжатия. На данный момент существует лишь одно судно (проект 03622 «Чайка»), которое использует СПГ в качестве топлива [1]. Из-за высокой плотности СПГ является более энергоэффективным типом топлива, чем КПГ. Сравнение топлив представлено в таблице 1.

Таблица 1

Сравнение типов топлива

Проект	Количество ед.	Тип главного двигателя	Кол-во x мощность, кВт
СК2000 КН	7	8NVD-36A-IU	2x425
P-77	36	6NVD48AU	2x485
1754БМ	9	8NVD36	2x294
414В	9	6NVD-26A3	2x272
621	7	6NVDS48A-2U	2x640
866/866М	21	3Д6-150	2x110

Сдерживающими критериями при применении СПГ являются сложность адаптации существующих проектов судов под его использование, а также топливная логистика. Одним из путей решения этой проблемы является применение судов-бункеровщиков [2]. Однако СПГ в больших объемах производится в северной части России. При использовании СПГ на судах северных пароходств значительно снизятся транспортные издержки из-за уменьшения плеча доставки топлива от места его производства до места его потребления. При портовой бункеровке судов, область работы которых находится недалеко от места производства СПГ, необходимость в специальных судах-бункеровщиках отпадает.

СПГ вписывается в международные нормы, контролирующие выбросы продуктов сгорания судового топлива МАРПОЛ [3], что особенно критично в северных и арктических регионах, поскольку через территорию особого контроля проходит маршрут северного морского пути (СМП). Также в северных регионах развит речной транспорт, осуществляющий снабжение населенных пунктах в рамках «северного завоза».

В тексте статьи рассмотрены флоты пароходств, действующих по магистральным сибирским рекам и их судоходным притокам: Обь-Иртышское речное пароходство (ОИРП), Иртышское речное пароходство (ИРП), Енисейское речное пароходство (ЕРП) и Ленское объединенное речное пароходство (ЛОРП). Несмотря на то, что хозяйствующих субъектов гораздо больше, в данной статье рассмотрены только те, чья география перевозок включает в себя арктические районы.

Анализ флотов северных пароходств

Ведущее место в производственно-хозяйственной деятельности предприятий речного транспорта занимает перевозка нерудных строительных материалов (НСМ). Доля перевозок нефтепродуктов составляет около 40-45% [4].

Попадающее число грузоперевозок осуществляется самоходными судами. Для различных пароходств процент буксирно-баржевых перевозок колеблется от 70 до 90% [4].

При анализе флотов северных пароходств выявлены наиболее распространенные типы танкеров. Типы самоходных нефтеналивных танкеров и их силовые установки приведены в таблице 2 [5-7].

Таблица 2

Типы самоходные нефтеналивных танкеров

Проект	Количество ед.	Тип главного двигателя	Кол-во х мощность, кВт
1741А (РТ-600)	38	8ЧНСП 18/22	2х221
		6NVD-26A3	2х272
Р33ЛТМ (Плотовод)	20	6NVD-26A3	2х272
428 (ОТ-2000)	25	8NVD-48-2А	2х773
433	1	3Д6-150	1х150
758Б (ОТА-800)	18	6NVD-48U	2х294
Р-96	2	3Д6Н-150	1х110
758 (ОТ-800)	13	6NVD-48	2х294
Р-103	19	6ЧСП15/18	2х110
Р-96А	25	3Д6Н-150	1х110

В таблице 3 представлены наиболее распространенные типы буксиров, участвующих в буксирно-баржевом транспорте.

Таблица 3

Типы буксиров

Проект	Количество ед.	Тип главного двигателя	Кол-во х мощность, кВт
1741А (РТ-600)	38	8ЧНСП 18/22	2х221
		6NVD-26A3	2х272
Р33ЛТМ (Плотовод)	20	6NVD-26A3	2х272
428 (ОТ-2000)	25	8NVD-48-2А	2х773
433	1	3Д6-150	1х150
758Б (ОТА-800)	18	6NVD-48U	2х294
Р-96	2	3Д6Н-150	1х110
758 (ОТ-800)	13	6NVD-48	2х294
Р-103	19	6ЧСП15/18	2х110
Р-96А	25	3Д6Н-150	1х110

Сгруппировав двигатели от различных типов судов, можно оценить массовость их эксплуатации. Результаты представлены в таблице 4.

Группировка по типу главного двигателя

Марка и модель главного двигателя	Количество судов
ЗД6-150	48
6NVD48AU	36
6NVD-26A3	67
8NVD-48-2A	26
6NVD-48U	31

Модернизация под использование топливного СПГ

При переводе судовых дизелей под использование газомоторного топлива (ГМТ) применяются две основные концепции:

- Использование искрового зажигания газозвушной смеси с большим изменением первоначальной конфигурации двигателя и полным переходом на ГМТ;
- Применение газодизельного режима, когда ДТ используется как пилотное – для воспламенения основной газозвушной смеси [8]. Степень сжатия сохраняется как у дизельного двигателя.

Второй способ требует значительно меньших материальных затрат. При воспламенении ДТ микроконтроллер подает необходимое количество ГМТ. Проблема возможной детонации, ограничивающей возможность сжатия газозвушной смеси в цилиндре, решается путем использования обедненной газозвушной смеси – чем беднее газозвушная смесь, тем большее сжатие допустимо в цилиндре. Рабочая смесь поджигается не в одной точке около стенки, а в центре заряда, что положительно влияет на срок службы ДВС [9].

Также использование газодизельного двигателя позволяет добиться большой гибкости в плане топливной логистики. Дополнительное снижение затрат на модернизацию речных ГД для работы в газодизельном режиме заключается в установке общего газозвушного смесителя, питающего смесью все цилиндры маломощного двигателя [10]. Для главных двигателей (ГД) средней и высокой мощности на каждый цилиндр двигателя устанавливают индивидуальные клапаны-смесители.

Доля пилотного ДТ, которое требуется для воспламенения основного ГМТ для средне- и малооборотных двигателей составляет 5-8%. В некоторых двигателях компании Wärtsilä доля пилотного ДТ составляет 1% [11].

На сегодняшний день перечень двигателей, приведенный в таблице 4, устарел как морально, так и конструктивно. Износ двигателей и отсутствие запчастей вынуждает судовладельцев переходить на современные аналоги. В таблице 5 приведены аналоги судовых двигателей и дизель-редукторных агрегатов (ДРРА).

Основные сдерживающие факторы для внедрения газодизельных ГД на речных судах это:

- хранение на судне основного запаса топлива;
- рациональное расположение газового оборудования, удобство и безопасность его эксплуатации и обслуживания;
- бункеровка СПГ;
- отсутствие навыков эксплуатации газодизельных судовых установок и криогенных топливных танков у плавсостава.

Таблица 5

Аналоги главных двигателей

Марка и модель главного двигателя	Аналог		Производитель	Расход газодизельного топлива г/кВт*ч (8% ДТ)
3Д6-150	ЯМЗ-236 атмосферный		Ярославский моторный завод	17,2 гр. ДТ 166 гр. СПГ
6NVD48AU	6ЧН21/21		Завод "Волжский дизель имени Маминых" (Балаково)	От 16 до 20 гр.ДТ От 156 до 195 гр. СПГ соотв.
6NVD-26A3				
8NVD-48-2A				
6NVD-48U				

Размещение основного запаса СПГ выполняется в соответствии с частью XII Правил РРР (ред. 2019 г.). Допускается размещение в корпусе судна (ниже главной палубы), частично выше главной палубы и выше главной палубы. Все зависит от проекта судна, которое будет переделываться на работу в газодизельном режиме двигателя.

Для модернизации существующих проектов судов под использование СПГ необходимо вписать криогенный топливный танк в геометрию судна без значительного изменения корпуса. В корпусе должно быть размещено не только емкостное оборудование, но также испарители и подогреватели СПГ, а также система подачи метана в газоздушный смеситель.

Наиболее распространенный тип судовых топливных танков на малотоннажных судах – это цилиндрические танки типа С с вакуумной изоляцией [12]. На крупных судах применяются мембранные топливные танки или вкладные призматические танки типов А и В.

Танки типа С просты в изготовлении и установке, имеют время бездренажного хранения до 40 часов и уже производятся в России. Главным их недостатком является неэффективное использование полезного пространства. Сравнение типов танков по эффективности использования полезного пространства приведено на рисунке 1 [13].

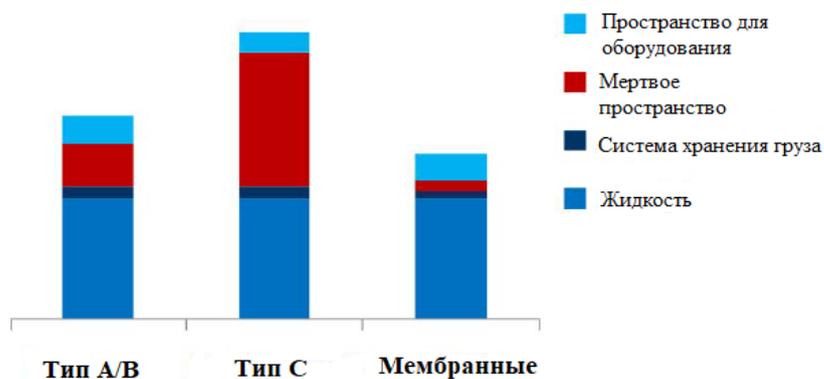


Рис. 1 - Сравнение различных систем топливных танков

Для увеличения автономности плавания при переходе на альтернативное топлива и сохранения геометрии корпуса судна, необходимо использовать призматические танки типа В. Эти призматические танки выполняются вкладными, что позволяет сооружать их отдельно от судна и легко устанавливать в корпусе. Удельный вес этой

системы составляет $0,015 \text{ т/м}^3$, что значительно меньше, чем удельный вес танков типа С ($0,073 \text{ т/м}^3$) [14-15].

При вписывании криогенного топливного танка в объем существующего топливного танка наблюдается снижение автономности плавания по топливу. Несмотря на то, что массовая теплота сгорания СПГ выше, чем у ДТ, из-за меньшей плотности СПГ, а также необходимого объема для тепловой изоляции и специфического оборудования, коэффициент полезного использования пространства снижается.

Коэффициент полезного использования пространства призматическими танками типа В составляет 0,59. Для танков типа С этот коэффициент существенно ниже – 0,42. В случае разработки проекта нового буксира могут быть использованы мембранные топливные танки с самым высоким коэффициентом полезного использования пространства – 0,73.

Автономность плавания по топливу рассчитывается следующим образом. Все расчеты приведены на примере судна проекта 1741А.

Автономность плавания у судна этого проекта, согласно документации, составляет 20 суток [16]. Объем топливного танка – $65,3 \text{ м}^3$. В таком случае объем СПГ для танков различных типов будет:

$$V_{\text{тип С}} = 65,3 \cdot 0,42 = 27,4 \text{ м}^3 \quad (1)$$

$$V_{\text{тип А/В}} = 65,3 \cdot 0,59 = 38,7 \text{ м}^3 \quad (2)$$

$$V_{\text{мембрана}} = 65,3 \cdot 0,73 = 47,6 \text{ м}^3 \quad (3)$$

При модернизации проекта судна предполагается установить главный двигатель 6ЧН21/21 с расходом СПГ 156 г СПГ/кВтЧ . В таком случае объемный часовой расход СПГ при работе двух двигателей мощностью 272 кВт будет:

$$Q_{\text{СПГ}} = \frac{q \cdot M \cdot n}{\rho_{\text{СПГ}}} = \frac{156 \cdot 10^{-3} \cdot 272 \cdot 2}{430} = 0,197 \text{ м}^3/\text{ч} \quad (4)$$

где q – расход топлива, г/кВтЧ ; M – мощность двигателя, кВт ; n – количество двигателей; $\rho_{\text{СПГ}}$ – плотность СПГ, кг/м^3 .

Отсюда можно определить автономность плавания при использовании топливных танков различных типов:

$$A_{\text{тип С}} = \frac{V_{\text{тип С}}}{Q_{\text{СПГ}} \cdot 24} = \frac{27,4}{0,197 \cdot 24} = 5,8 \text{ сут} \quad (5)$$

$$A_{\text{тип А/В}} = \frac{V_{\text{тип А/В}}}{Q_{\text{СПГ}} \cdot 24} = \frac{38,7}{0,197 \cdot 24} = 8,2 \text{ сут} \quad (6)$$

$$A_{\text{тип С}} = \frac{V_{\text{мембрана}}}{Q_{\text{СПГ}} \cdot 24} = \frac{47,6}{0,197 \cdot 24} = 10,1 \text{ сут} \quad (7)$$

Объем танка ДТ определен в зависимости от доли пилотного топлива. В данной статье доля пилотного ДТ принята 8%. Наличие небольших танков с ДТ обязательно на судне.

В таблице 6 представлен сравнительный анализ автономности плавания по топливу для танков различных типов.

Таблица 6

Сравнение изменения автономности плавания

Название проекта судна:	Существующий проект, сут	Танки типа А/В, сут	Танки типа С, сут	Мембранные танки, сут
1741А	20	8,2	5,8	10,1
Р33ЛТМ	9	4,4	3,1	5,5
ОТ-2000	12	5,9	4,2	7,3
433	3	1,1	0,8	1,3
ОТА-800	15	9,4	6,6	11,5
Р-96	3	4,0	2,8	4,9
ОТ-800	15	9,4	6,6	11,5
Р-103	7	3,7	2,6	4,6

При развитии системы бункеровки судов СПГ проблема снижения автономности плавания судна по топливу будет нивелирована. Опыт эксплуатации судна проекта 03622 «Чайка-СПГ» показал, что заправка судна СПГ возможна с берега с автомобиля-газовоза при соблюдении норм безопасности. При появлении плавучих заправочных терминалов заправка будет производиться именно с них.

Заключение

Анализ требований Правил РРР части XII ПКПС (ред. 2019 г.) и состава наиболее распространенных речных проектов судов показал, что модернизация эксплуатируемых судов в газоходы возможна и для этого имеются все условия:

- нормативная база, в первую очередь - нормативно-техническая база: Правила РРР ч. XII ПКПС ред. 2019 года и Технический регламент о безопасности объектов внутреннего водного транспорта;
- наличие проектных организаций, осуществляющие проектирование и модернизацию речных судов;
- наличие оборудования на отечественном рынке для реализации проекта;
- возможность заправки судов СПГ.

Наиболее эффективно внедрение судов, использующих СПГ как топливо в северных регионах, в которых есть ресурсная база производства СПГ. Эффективность достигается за счет уменьшения плеча доставки топлива от места производства к месту его потребления. Также в северных регионах действуют более строгие нормативы контроля выбросов, и использование СПГ в качестве топлива способно решить эту проблему.

Проблемы при переводе существующих типов судов на СПГ могут быть связаны со снижением автономности плавания судна по запасам топлива. При встраивании криогенных топливных танков в пространства корпуса на место традиционных топливных танков автономность плавания может снизиться в два раза.

Литература

1. Костылев И.И., Коняев Д.В. Бункеровка как фактор сдерживания применения газового топлива на судах // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2016. №5 (39);
2. Зеленодольский завод имени А.М. Горького спустил на воду первое речное пассажирское судно на СПГ «Чайка» URL: <https://portnews.ru/news/299898/> (дата обращения 14.09.2020);
3. МАРПОЛ 73/76 Приложение VI Правила предотвращения загрязнения атмосферы с судов URL: <http://docs.cntd.ru/document/499014496> (дата обращения 14.09.2020);

4. Григорьев Е.А. Экономическая оценка ресурсосберегающих технологий работы речных судов: дисс. канд. эконом. наук: 08.00.05 защищена 30.05.14. утв.: // автор Евгений Алексеевич // Сибирский государственный университет путей сообщения – Новосибирск - 2014, 151 с;
5. Официальный сайт Обь-Иртышского речного пароходства URL: <https://oirp.ru/> (дата обращения 15.09.2020);
6. Официальный сайт ОАО «Ленское объединенное речное пароходство» URL: <http://lorp.ru/> (дата обращения 15.09.2020);
7. Водный транспорт URL: <https://fleetphoto.ru/> (дата обращения 15.09.2020);
8. Безюков О.К., Жуков В.А., Воробей К.А. Анализ энергоэкологического эффекта применения газопоршневых двигателей в судовых энергетических установках // Вестник государственного университета морского и речного флота им адмирала С.О. Макарова – 2015, №6(34), с 143-151. DOI: 10/21821|2309-5180-2015-7-6-143-151;
9. Дорохов А.Ф., Апкаров И.А., Хоан Коанг Лыонг Особенности применения газообразных топлив в судовых энергетических установках // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. 2012. №2, с 70-75;
10. Ведрученко В.Р., Крайнов В.В., Кокшаров М.В, Лазарев Е.С., Кузнецова Д.К. О технических решениях при переводе транспортных и судовых ДВС на использование газообразного топлива // ОНВ – 2014. №3 (133);
11. Wärtsilä 20DF Product Guide URL: https://www.wartsila.com/docs/default-source/product-files/engines/df-engine/product-guide-o-e-w20df.pdf?utm_source=engines&utm_medium=dfengines&utm_term=w20df&utm_content=productguide&utm_campaign=msleadscoring (дата обращения 15.09.2020);
12. Michael Kraack LNG infrastructure and shipbuilding // GO LNG – Final Conference to the SBSR Project «MarTech LNG», Klapeida 10.09.2015;
13. Баранов А.Ю., Иванов Л.В. Анализ конструктивных особенностей систем хранения груза для модернизации проекта речного танкера класса «река-море». // Морской Вестник – 2019, №3(71) – с 18-21;
14. Y. Nagata, A. Tanoue, T. Kida, T. Kawai IHI SPB Tank for LNG fueled ships // IHI Engineering Review – 2015. №2 (47);
15. DNVGL-CG-0133 Class Guideline Liquefied gas carriers with independent prismatic tanks of type A and B – 2017;
16. Речная справочная книжка корабельного инженера Е. Л. Смирнова URL:<https://russrivership.ru/ships/30> (дата обращения 06.10.2020).

References:

1. Kostylev I.I., Koniaev D.V. «Bunkering as a factor in restraining the use of gas fuel on ships) // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo transporta imeni admirala S.O. Makarova – 2016. №5 (39);
2. Zelenodolskiy zavod imeni A.M. Gor'kogo spustil na vodu pervoe rechnoe passajirskoye sydno na SPG «Chayka» Web. 14. Sep. 2020 <<https://portnews.ru/news/299898/>>;
3. MARPOL 73/76 Annex 5;
4. Grigoriev E.A. Economicheskaya ocenka resursosberegajushih tehnologiy raboty rechnih sudov: PhD thesis – 2014;
5. Official site of Ob-Irtish shipping company. Web. 14. Sep. 2020 <<https://oirp.ru/>>;
6. Official site of Lena shipping company. Web. 14. Sep. 2020 <<http://lorp.ru/>>;
7. Vodniy transport. Web. 14. Sep. 2020 : <<https://fleetphoto.ru/>>;
8. Bezykov O.K., Jukov, V.A., Vorobey K.A. Analis energoecologicheskogo effecta primeniya gazoporshnevih dvigateley v sudovih energeticheskikh ustanovkah (Analysis of the energy-ecological effect of the use of gas piston engines in ship power plants) // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo transporta imeni admirala S.O. Makarova – 2015. №6 (34); с 143-151. DOI: 10/21821|2309-5180-2015-7-6-143-151;
9. Dorohov A.F., Akparov I.A., Hoan Koang Liong Osobennosti primeniya gasoobrasnih topliv v sudovih energeticheskikh ustanovkah (Features of the use gas fuels in ship power plants) // Vestnik AGTU. Seria: Moskaya tehnika I tehnologiya. 2012. №2, с 70-75;
10. Vedruchenko V.R., Kraynov V.V., Kokparov M.V., Lazarev E.S., Kuznetsova D.K. O tehniceskikh resheniyah pri perevode transportnih I sudovih DVS na ispol'sovanie

- gasoobrasnogo topliva (About technical solutions for the transport and ship internal combustion engines to use natural gas as a fuel) // ONV – 2014. №3 (133);
11. Warstila 20DF Product Guide URL: https://www.wartsila.com/docs/default-source/product-files/engines/df-engine/product-guide-o-e-w20df.pdf?utm_source=engines&utm_medium=dfengines&utm_term=w20df&utm_content=productguide&utm_campaign=msleadscoring (дата обращения 15.09.2020);
 12. Michael Kraack LNG infrastructure and shipbuilding // GO LNG – Final Conference to the SBSR Project «MarTech LNG», Klapeida 10.09.2015;
 13. Б Баранов А.У., Иванов Л.В. Analis konstrukcionnih osobennostey siste, hraneniya gruzha dlya modernizatsii projecta rechnogo tankera klassa reka-more (Analysis of the structural features of cargo containment systems for the modernization of a river-sea tanker project) // Morskoy Vestnik – 2019, №3(71) – с 18-21;
 14. Y. Nagata, A. Tanoue, T. Kida, T. Kawai IHI SPB Tank for LNG fueled ships // IHI Engineering Review – 2015. №2 (47);
 15. DNVGL-CG-0133 Class Guideline Liquefied gas carriers with independent prismatic tanks of type A and B – 2017;
 16. Rechanaya spravochnaya knijka korabelnogo injenera E.L. Smirnova. Web. 06. Oct. 2020 «<https://russrivership.ru/ships/30>»;

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Иванов Лев Владимирович, аспирант кафедры низкотемпературной энергетики, Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, e-mail: levladiv@mail.ru

Lev V. Ivanov, graduate student of low-temperature energetics department, ITMO University, Saint-Petersburg, Lovonosov st, 9, e-mail: levladiv@mail.ru

Соловьёв Алексей Валерьевич, док. техн. наук, доцент кафедры систем информационной безопасности, управления и телекоммуникаций Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: solovev@rivregnn.ru

Alexey V. Soloviev, Dr Tech. Sc, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Румянцев Эрнест Георгиевич, магистр, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: rumernest@gmail.com

Ernest G. Rumiantcev, Master, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 25.01.2021; опубликована онлайн 23.03.2021.
Received 25.01.2021; published online 23.03.2021.

УДК 621.314

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi66.148>

Исследование параллельной работы дизель-генераторов судовой электростанции

С.В. Попов¹

О.А. Бурмакин¹

Ю.С. Малышев¹

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

Аннотация. Анализ электростанций ряда пассажирских судов показал необходимость обеспечения параллельной работы дизель-генераторов (ДГ) ранее работавших раздельно. Установленные ДГ предназначены только для автономной работы, и не предполагают введения статизма в характеристики генераторов. Целью работы является обоснование и реализация рабочего состояния судовых электростанций в соответствии с действующими требованиями Российского Речного Регистра (РРР), предполагающими устойчивую параллельную работу ДГ. Эксплуатация установленных дизелей показала сложность точного регулирования механических характеристик, связанную со спецификой работы механических регуляторов частоты вращения (РЧВ), установленных на двигатели. Для определения качества механического РЧВ разработаны функциональные и структурные схемы системы стабилизации частоты вращения приводного двигателя с механическим регулятором, на основании которых получена передаточная функция и сделан вывод о неустойчивости работы регулятора при больших значениях люфтов в механической передаче. Достижение поставленной цели возможно путем замены механического РЧВ на электронный с актуатором, что подтверждено математическим анализом соответствующих систем регулирования. Передаточные функции систем регулирования получены на основе разработанных структурных и функциональных моделей. Электронные регуляторы, выполненные по представленным схемам, внедрены на ряде судовых дизель-генераторных установок и показали положительный результат. В результате исследования работы новой системы были определены оптимальные параметры настроек регуляторов, при которых были получены требуемые РРР динамические и статические характеристики. Безотказное функционирование системы подтверждено длительными испытаниями при работе судна в штатном режиме в течение всей навигации.

Ключевые слова: судовая электростанция, дизель-генераторные установки, параллельная работа генераторов, судовые потребители, механические характеристики двигателей, статизм характеристик, механический регулятор оборотов дизеля, электронный регулятор скорости вращения.

Study of parallel operation of diesel generators of a ship power plant

Sergey V. Popov¹

Oleg A. Burmakin¹

Yuriy S. Malyshev¹

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

Abstract. Analysis of the power plants of a number of passenger ships showed the need to ensure the parallel operation of generators previously operating separately. The installed DGs are intended only for autonomous operation, which do not imply the introduction of statism

into the characteristics of the generators. The aim of the study is to scope and implement the working condition of the ship power plants in accordance with the current requirements of the Russian River Register (RRR), which imply stable parallel operation of the diesel generator. As a result of the operation of the installed diesel engines, the complexity of precise control of the mechanical characteristics was determined, associated with the specifics of the operation of the mechanical frequency controllers installed on the engines. To determine the quality of mechanical RFI, functional and structural diagrams of the system for stabilizing the frequency of rotation of a drive motor with a mechanical regulator were developed, on the basis of which the transfer function was obtained and a conclusion was made about the instability of the regulator at large values of backlash in the mechanical transmission. The achievement of this goal is possible by replacing the mechanical RFI with an electronic one with an actuator, which is confirmed by a mathematical analysis of the corresponding control systems. The transfer functions of control systems are obtained on the basis of the developed structural and functional models. Electronic controllers, made according to the presented schemes, have been introduced on a number of marine diesel generator sets and tested positive. As a result of the study of the new system operation, the optimal parameters of the regulator settings were determined, at which the required dynamic and static characteristics were obtained. The failure-free operation of the system has been confirmed by long-term tests with the vessel operating in normal mode throughout the navigation.

Keywords: ship power plant, diesel generator sets, parallel operation of generators, ship consumers, mechanical characteristics of engines, tilt characteristics, mechanical speed controller of diesel, electronic speed controller.

Введение

Суда речного флота эксплуатируются, как правило, в течении длительного времени. За это время технические требования к оборудованию судна изменяются, и одновременно устаревает уже установленное на судне техническое оборудование, в частности судовые электроэнергетические системы, что в конечном итоге требует их модернизации или замены.

В целях экономии средств при плановой замене дизель-генераторных (ДГ) установок для ряда судов была произведена закупка судовых агрегатов мощностью 100 кВт, предназначенных только для автономной работы. Система регулирования таких ДГ не предполагает введения статизма в характеристики генераторов. Однако, исходя из правил Российского Речного Регистра постройки судов внутреннего плавания (ПСВП) часть 4 п.3.6, источники электроэнергии должны обеспечивать как минимум кратковременную параллельную работу для перевода нагрузки с одного генератора на другой [1]. Отсюда следует, что обеспечение возможности параллельной работы дизель-генераторных агрегатов при переоборудовании судовой электростанции, является обязательным условием. В ряде случаев, переоборудование ДГ - агрегатов является экономически обоснованным, хотя и связано с большим числом документов и согласований.

Описание существующего объекта исследования и постановка задачи

На одном из судов 588-го проекта была выполнена замена четырех устаревших ДГ-агрегатов, составляющих основную электростанцию, на новые. Специфика главного распределительного щита (ГРЩ) электростанции содержит силовое коммутационное оборудование и схему распределения электроэнергии, которая позволяет выполнять раздельную работу на группы потребителей судна. В течение нескольких лет состав электрооборудования судна претерпел существенные изменения в сторону увеличения потребляемой мощности, поэтому энергии двух

раздельно работающих ДГ для обеспечения всех потребителей электроэнергией недостаточно. Эксперименты включения на параллельную работу ДГ судовой электростанции показали, что длительная параллельная работа генераторов в любой их комбинации невозможна.

Из теории известно, что для устойчивой параллельной работы дизель-генераторов и равномерного распределения нагрузки между ними их характеристики должны иметь статизм [2-5]. Дизельные двигатели новых агрегатов оснащены механическими регуляторами и имеют грубую регулировку для настройки номинальных оборотов двигателя. В ходе эксплуатации двигателей было выявлено, что при прогреве или при длительной их работе под нагрузкой настройка оборотов либо смещается в ту или иную сторону от номинала, либо наблюдается периодическое качание (изменение) оборотов около номинального значения. Периодическая настройка специалистами фирмы-поставщика ДГ насосов ТНВД (топливный насос высокого давления) и регуляторов не приводила к существенным улучшениям работы машин с точки зрения точности поддержания оборотов, а значит, и частоты напряжения генераторов.

Также на двигателе установлен механизм воздействия на топливную рейку (рис. 1), приводящийся в действие системой управления пуском и остановом ДГ. Этот механизм представляет собой электродвигатель с червячной передачей хода штока - перемещающегося элемента, который ограничивается двумя конечными выключателями.

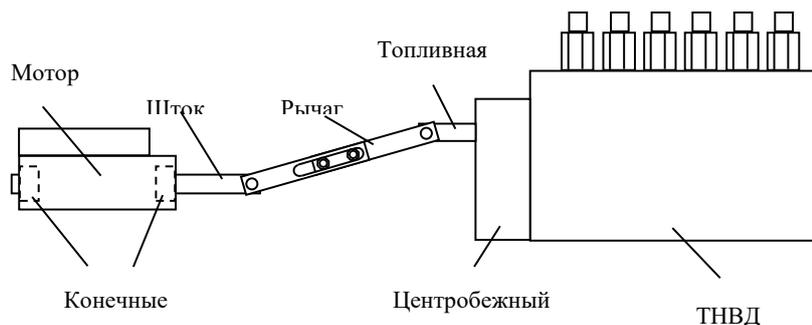


Рис. 1. Система с механическим регулятором частоты вращения двигателя

Оба выключателя являются датчиками положения штока, а значит, и топливной рейки, которые соответствуют полному перекрытию топлива и номинальной частоте вращения двигателя на холостом ходу. Положение топливной рейки при срабатывании второго микровыключателя может быть отрегулировано изменением длины дополнительной тяги. Регулирование положения штока возможно за счет подачи импульса напряжения на электродвигатель механизма вручную или автоматически.

Анализ механических характеристик (рис. 2), полученных экспериментально, показал, что характеристики имеют различный наклон, который может изменяться хаотичным образом (характеристики 1), что связано с наличием люфтов в механических передачах регулятора. Функциональная схема системы регулирования частоты вращения вала дизеля приведена на рисунке 3.

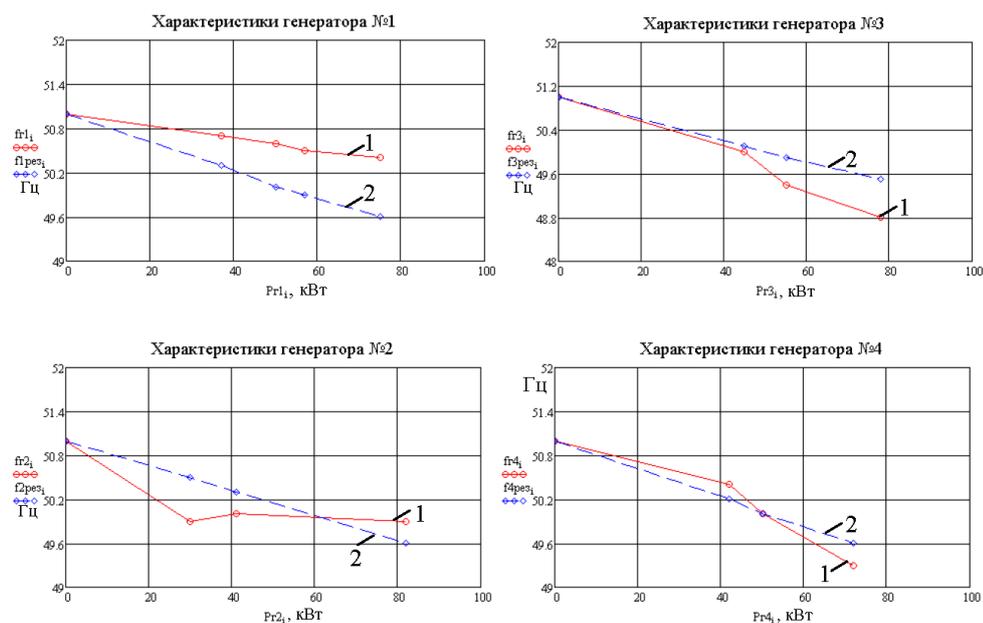


Рис. 2. Механические характеристики дизель-генераторов теплохода с механическими регуляторами частоты вращения - 1 и с электронными регуляторами - 2

Для реализации режима параллельной работы были выполнены попытки настройки механических характеристик двигателей при поочередном подключении одной и той же нагрузки. Исследование возможностей регулятора показало, что изменение положения топливной рейки выполняется с ограниченным быстродействием и достаточно низкой точностью. Периодические «перетоки» энергии от одного генератора к другому неизбежно приводят к отключению одного из генераторов средствами защиты.

Для определения качества РЧВ вала дизеля прямого действия составим функциональную схему системы (рис. 3) и ее динамическую модель.

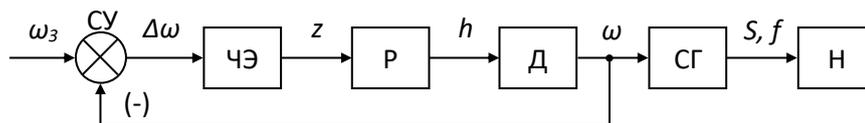


Рис. 3. Функциональная схема РЧВ вала дизеля:

СУ – суммирующее устройство; ЧЭ – чувствительный элемент; Р – регулятор; Д – дизель (объект управления); СГ – синхронный генератор; Н – нагрузка; ω_3 , ω – заданная и текущая величина угловой скорости вала дизеля, соответственно; $\Delta\omega$ – ошибка управления; z – положение муфты регулятора; h – положение рейки ТНВД; S – полная мощность; f – частота напряжения.

Механический регулятор частоты вращения двигателя может быть представлен структурой, содержащей несколько звеньев: центробежный чувствительный элемент (ЧЭ) с передаточной функцией

$$W_{\text{чз}}(p) = \frac{k_T}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1},$$

изодромное устройство – регулятор (P) с передаточной функцией

$$W_{\text{и}} = \frac{K_p (T_n p + 1)}{p(1 + T_p \cdot p)},$$

звено, определяющее зону нечувствительности - люфт

$$\varepsilon = \begin{cases} D_\varepsilon - D_n & \text{при } pD_\varepsilon > 0 \\ D_\varepsilon + D_n & \text{при } pD_\varepsilon < 0 \\ \text{const} & \text{при } |D_\varepsilon - \varepsilon| < D_n \end{cases}$$

где D_n – значение зазора люфта, D_ε – разность между заданной ω_z и действительной ω частотами вращения дизеля. Графически характеристика типа «люфт» имеет вид, представленный на рисунке 4.

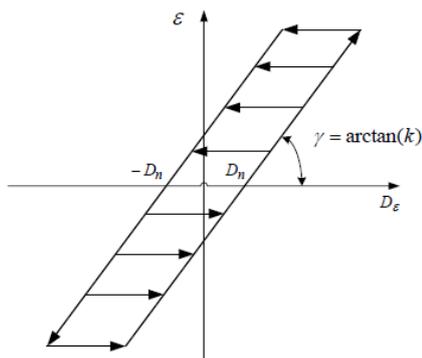


Рис. 4. Характеристика типа «люфт»

Дизельный двигатель (Д) может быть представлен в виде трех звеньев, описывающих тепловое преобразование энергии, инерцию и приложенную к валу нагрузку (рис. 5.) Преобразование тепловой энергии в движущий момент дизеля – M_D можно представить узлом сгорания топлива - УСТ, который выражается апериодическим звеном с коэффициентом K_T и постоянной времени T_C :

$$W_D = \frac{K_T}{1 + T_C \cdot p}$$

Механическая часть дизеля с маховиком представлена интегрирующим звеном с коэффициентом K_D постоянной времени T_D :

$$W_M = \frac{K_D}{T_D \cdot p}$$

Как показывают экспериментальные исследования постоянной времени сгорания топлива T_C можно пренебречь, отнеся ее к малым постоянным времени.

На валу двигателя действуют три момента: момент, развиваемый дизелем - M_D ; момент сопротивления - M_{CD} , учитывающий трение, и момент нагрузки - M_G , возникающий на валу генератора - G при его загрузке активной мощностью. В структурной схеме дизеля (рис. 5) влияние нелинейного звена можно представить как действие момента сопротивления - M_{CD} величина которого составляет $8 \div 12$ % от номинального момента дизеля при номинальной частоте вращения. Это объясняется тем, что работа дизеля происходит при частоте близкой к номинальной во всем диапазоне нагрузок, т.е. в окрестностях ω_H нелинейного звена (кривая 1), поэтому оно может быть заменено звеном с постоянным коэффициентом передачи (пунктирная прямая 2):

$$K_{CD} = \frac{M_{CD}}{\omega_H}$$

где M_{CD} – собственный момент сопротивления.

Таким образом, структурная схема механической части дизеля может быть представлена интегрирующим звеном, охваченным отрицательной обратной связью с постоянным коэффициентом, т.е. апериодическим звеном со следующими параметрами:

$$W_{MD} = \frac{1/K_{CD}}{1 + \frac{T_D}{K_D \cdot K_{CD}} p} = \frac{K'_D}{1 + T'_D p}$$

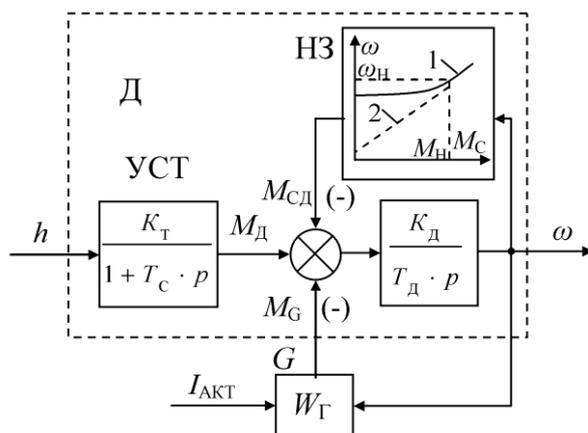


Рис. 5. Структурная схема дизеля

Качество автоматического регулирования угловой скорости вала дизеля определяется качеством переходных процессов в системе регулирования и зависит от правильности настроек регулятора. Для определения параметров регулятора рассмотрим структурную схему системы стабилизации частоты вращения (рис. 6), которая кроме элементов ЧЭ, Р и Д содержит звено нечувствительности - Л.

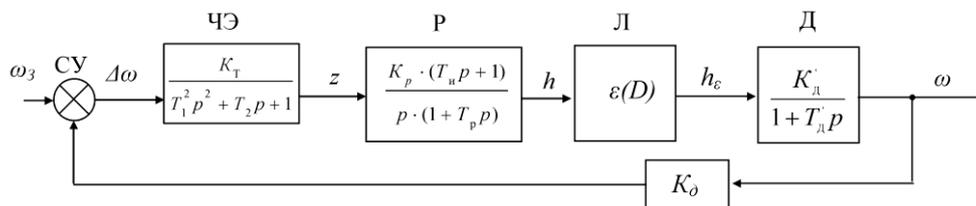


Рис. 6. Структурная схема системы стабилизации частоты вращения с механическим регулятором

Исходя из структурной схемы, можно определить статическую точность по возмущению, которая зависит от звена «Л»:

$$\Delta\omega_M = \frac{M_{G_{max}} \cdot W_M}{1 + W_{PA3}}$$

Поскольку передаточная функция разомкнутой системы W_{PA3} содержит функции дизеля и регулятора, то система регулирования не позволит обеспечить постоянный статизм характеристики двигателя, поэтому настройка системы при параллельной работе двух и более подобных дизель-генераторов усложняется из-за наличия люфтов с различными значениями зазоров, а настройка характеристик с целью получения их схожести практически не возможна.

Приближенная оценка перерегулирования σ может быть дана исходя из запаса по фазе на частоте среза – $\Delta\psi$:

$$\sigma_{max} = X_{уст} [1 - \sin \Delta\psi(\omega_c)] (100\%)$$

При превышении значения σ_{max} система становится неустойчивой. При параллельной работе ДГ с такими регуляторами система должна иметь большой запас по фазе, поскольку взаимное влияние люфтов регуляторов даже при малых значениях D_n выводит её из устойчивого состояния. Применение дополнительного регулятора для выполнения распределения нагрузок между параллельно работающими генераторами, воздействуя на мотор-регулятор, также не имеет смысла, поскольку в режиме постоянного регулирования механическая передача будет испытывать повышенный износ. Следовательно, регулирующий орган, как и регулятор, должны быть заменены на устройства, обладающие повышенной точностью и быстродействием.

Разработка и исследование электронной системы

В течение последних 15 лет для регулирования положения топливной рейки широко используют актуаторные системы с электронным регулятором скорости вращения двигателя [6-12]. Такие системы позволяют выполнять достаточно точное регулирование с высоким значением быстродействия и имеют высокую надежность [13]. Применяя электронные системы регулирования частоты вращения двигателей, возможно получить параллельную работу нескольких генераторных агрегатов при равномерном распределении нагрузки между ними [14]. Электронные системы

регулирования позволяют выполнять работу автономных газо-поршневых агрегатов параллельно с сетью и поддерживать загрузку генератора и сети на постоянном уровне [15].

Функциональная схема системы с электронным регулятором частоты вращения вала дизеля показана на рисунке 7. В системе установлен актуатор (А) – поворотный электромагнит, который через тягу воздействует на топливную рейку (ТР), регулируя подачу топлива в двигатель (Д). Обратная связь по скорости обеспечивается датчиком ДЧВ, измеряющим непосредственную скорость вала двигателя с высокой точностью. Напряжение задания U_3 поступает на вход регулятора, который управляет углом поворота выходного вала актуатора α за счет изменения тока электромагнита (что соответствует регулированию положения топливной рейки).

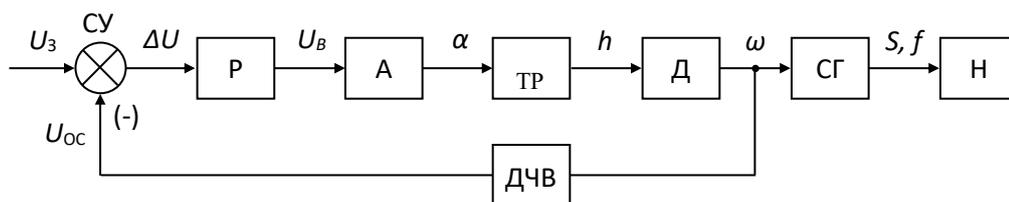


Рис. 7. Функциональная схема электронной системы регулирования частоты вращения дизеля

Для оценки динамических свойств системы регулирования составим структурную схему системы с электронным регулятором и актуатором. Поворотный электромагнит (актуатор) может быть представлен электромагнитной частью и механической частью с возвратной пружиной (см. рис. 8). Электромагнитная часть описывается аperiодическим звеном первого порядка с постоянной времени - $T_{aэ}$. Выходной ее координатой является ток или момент, развиваемый электромагнитом. Механическая часть описывается интегрирующим звеном с коэффициентом - K_a . Механическая часть охвачена отрицательной обратной связью, которую обеспечивает пружина. Ее жесткость оценивается величиной постоянного коэффициента - K_C . Так как выходной координатой актуатора является угол поворота его выходного вала, величина которого ограничена, на выходе актуатора установлен ограничитель - ОГР. После преобразования структурной схемы актуатора его передаточная функция может быть записана в виде:

$$W_A = \frac{K_p \cdot K_M / R_a \cdot 1/K_C}{(1+T_{э}p) \cdot (1+T_M p) \cdot (1+T_{пл})} = \frac{K_A}{(1+T_{э}p) \cdot (1+T_M p) \cdot (1+T_{пл})},$$

$$(T_M = \frac{1}{K_a \cdot K_C}) \quad (K_A = \frac{K_p \cdot K_M}{R_a \cdot K_C})$$

где T_M – механическая постоянная времени актуатора

$$W_A = \frac{K_{aэ} / R \cdot K_M}{1+T_{э} \cdot p \cdot 1+T_M \cdot p}$$

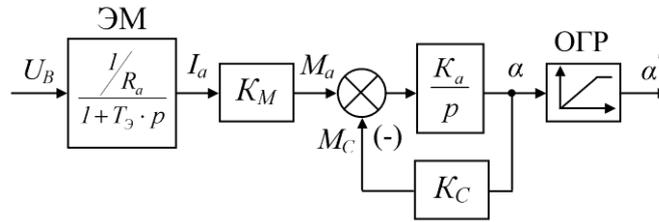


Рис. 8. Структурная схема актуатора

Как показывают экспериментальные исследования актуаторов, их механической постоянной времени – T_M можно пренебречь, отнеся ее к малым постоянным времени.

Оба звена охвачены единой отрицательной обратной связью, а возмущающее воздействие в виде момента сопротивления генератора – M_C приложено к входу интегрирующего звена.

Датчик частоты вращения – ДЧВ, представляющий собой преобразователь частоты вращения в частоту следования импульсов, может быть представлен звеном с чистым запаздыванием или аperiодическим звеном с малой постоянной времени $T_{OC} \approx \tau$.

На основании выполненных преобразований и упрощений структурной схемы системы регулирования частоты вращения (рис. 9) получим передаточную функцию объекта регулирования в виде:

$$W_{OP} = \frac{K_{\Sigma}}{(1 + T_B \cdot p) \cdot (1 + T_M \cdot p)(1 + T_{\mu} \cdot p)}$$

т. е. объект содержит две больших и одну малую некомпенсируемую постоянную времени. Для контура регулирования частоты вращения настроенного на модульный оптимум передаточная функция разомкнутой системы должна иметь вид:

$$W_{PA3} = \frac{1/K_{OC}}{2 \cdot T_{\mu} \cdot p \cdot (1 + T_{\mu} \cdot p)}$$

Тогда передаточную функцию регулятора найдем как отношение:

$$W_{PEГ} = \frac{W_{PA3}}{W_{OP}} = \frac{(1 + T_{K1} \cdot p) \cdot (1 + T_{K2})}{T_{\mu} \cdot p}$$

Таким образом, регулятор должен скомпенсировать две большие постоянные времени T_B и T_M и придать контуру интегрирующие свойства для исключения статической ошибки по задающему воздействию. Для этой цели необходим ПИД-регулятор.

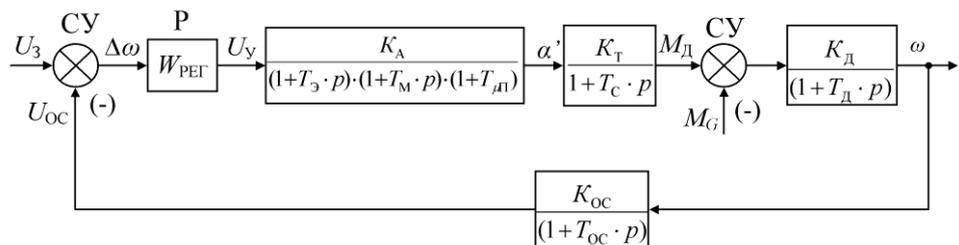


Рис. 9. Структурная схема электронной системы регулирования частоты вращения дизеля

Анализ W_{PA3} и W_f показывает, что в системе будет отсутствовать статическая ошибка по возмущающему воздействию, т. е.:

$$\Delta\omega_f = \frac{M_c \cdot W_f}{1 + W_{PA3}} = 0$$

Величины параметров K_{Σ} , T_B , T_M могут быть определены экспериментально по известным методикам, что позволяет установить требуемые параметры у регулятора частоты вращения.

Реализация и испытание разработанной системы

Для реализации быстродействующей системы на существующие двигатели были установлены актуаторы, тяги которых имеют возможность поворота на угол 60 гр. (рис. 10). При этом механические (центробежные) и моторные регуляторы были демонтированы. Электронные блоки цифрового регулятора частоты вращения (ЦРЧ) были установлены в шкаф управления двигателем. Для контроля скорости вращения двигателей около зубчатого колеса был установлен индукционный датчик, сигнал которого подается на ЦРЧ.

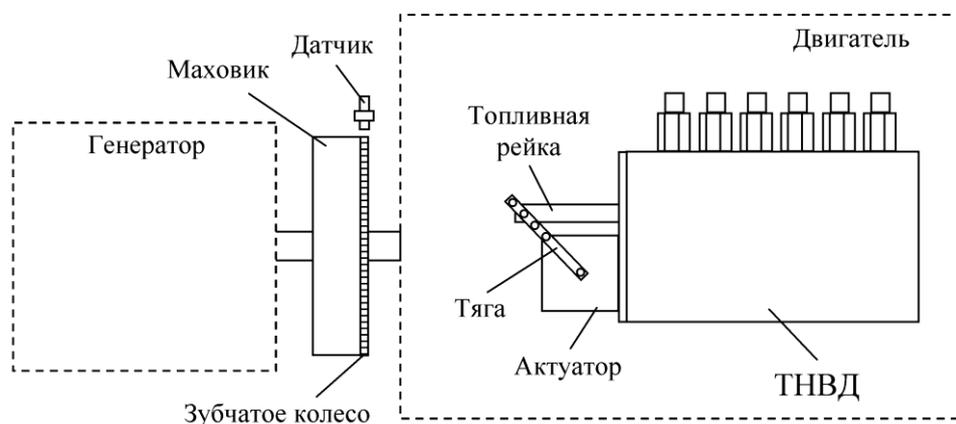


Рис. 10. ДГ с электронной системой регулирования частотой вращения двигателя

Функциональная схема системы регулирования с актуатором А показана на рисунке 11. Система регулирования интегрирована в систему управления работой и защитой двигателя с помощью релейной аппаратуры. По команде на запуск двигателя выполняется процесс стартерного пуска от аккумуляторной батареи, и при достижении минимальных оборотов, необходимых для «подхвата», система регулирования подает сигнал на отклонение актуатора, т.е. положения топливной рейки для запуска двигателя. Контролируя сигнал с датчика оборотов ДЧВ система за счет регулирования подачи топлива раскручивает двигатель до номинальной частоты вращения.

Принцип действия электронного блока основан на измерении текущего значения частоты вращения двигателя, сравнения его с заданным значением, формировании отклонения частот и регулировании тока поворотного электромагнита – актуатора в соответствии с величиной этого отклонения. Пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор позволяет выполнять регулирование с высокой

точностью в статических режимах работы ДГ и высоким быстродействием в динамических режимах работы ДГ при набросе и сбросе нагрузки.

Структурная схема системы регулирования показана на рисунке 12. После выполнения пуска двигателя частота холостого хода может быть отрегулирована потенциометром R_{CM} .

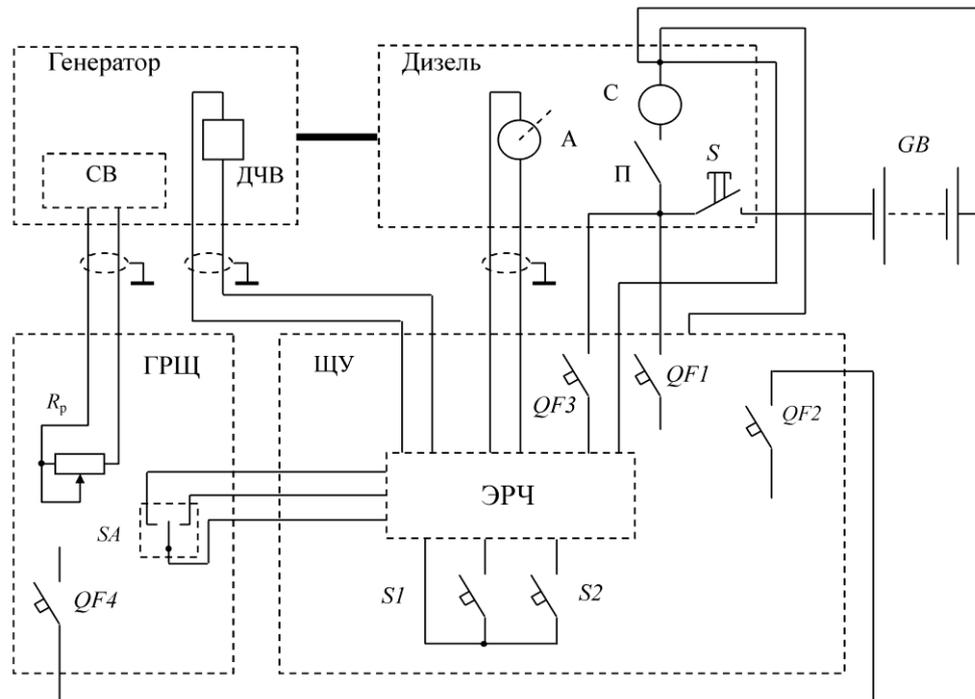


Рис. 11. Функциональная схема системы регулирования:
 GB – аккумуляторная батарея, С – стартер, П – пускатель, А – актуатор,
 ДЧВ – индукционный датчик частоты вращения, СВ – система
 возбуждения генератора, S – выключатель «массы», ЩУ – щит
 управления агрегатом, ЭРЧ – электронный регулятор частоты вращения
 дизеля, ГРЩ – главный распределительный щит, Rp – потенциометр
 регулировки напряжения генератора, SA – переключатель оборотов
 «больше/меньше» дизеля, QF1 – автоматический выключатель питания
 ЩУ (24В), QF2 – автоматический выключатель «Подогрев воды» (220В),
 S1 – выключатель «Прогрев», QF3 – автоматический выключатель
 питания ЦРЧ (24В), S2 – выключатель «Работа», QF4 – автоматический
 выключатель питания в ЩУ (220В).

При набросе (сбросе) нагрузки происходит резкое возрастание (снижение) момента сопротивления на валу двигателя, который имеет значительную постоянную времени, приводящую к затягиванию переходного процесса. Изменением значения потенциометра R_k регулируется коэффициент передачи пропорционального и дифференциального звеньев, что позволяет скомпенсировать отклоняющие воздействия и уменьшить время переходного процесса.

Поочередное исследование двигателей показало, что регулирование угла наклона механической характеристики двигателя достигается потенциометром R_{CT} и имеет значение 3-4 % при номинальной нагрузке от скорости холостого хода. Наклон характеристик остается постоянным и не изменяется при набросе и сбросе существенных нагрузок на ДГ. Постоянной остается и скорость холостого хода двигателей при их многократных остановках и запусках.

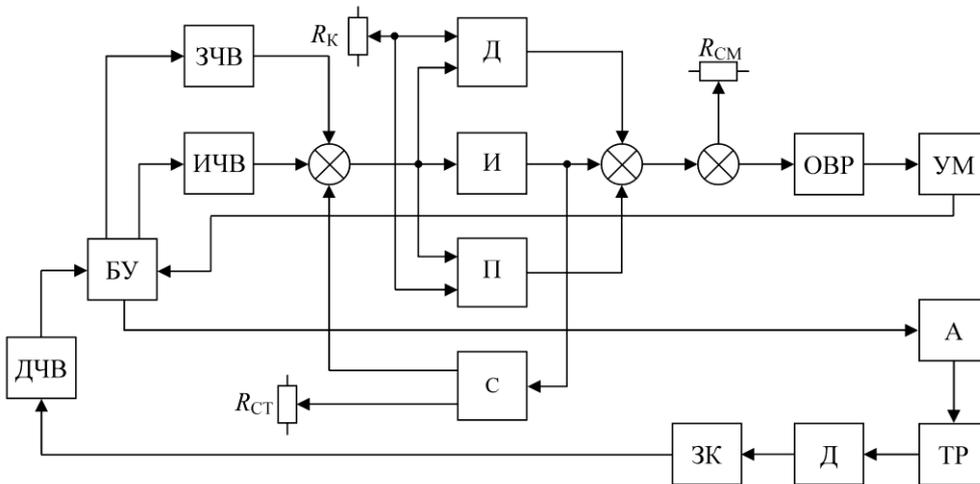


Рис. 12. Структурная схема системы регулирования:

ЗЧВ – задатчик частоты вращения, ДЧВ – датчик частоты вращения, ИЧВ – измеритель частоты вращения, Д-, И-, П-канал – дифференциальный, интегральный, пропорциональный каналы регулирования, С – блок задания статизма, ОВР – ограничитель вылета рейки, УМ – усилитель мощности, А – актуатор, ТР – топливная рейка, Д – двигатель, ЗК – зубчатое колесо, Rк, Rсм, Rст – потенциометры задания коэффициента, смещения и статизма, соответственно.

Для равномерного распределения нагрузки между параллельно работающими генераторами, имеющими одинаковую мощность, желательно получить схожие механические характеристики с одинаковым наклоном. На рисунке 13 показаны механические характеристики двух дизель-генераторов, включенных на параллельную работу. Если характеристика 1 одного из двигателей является астатической, а характеристика 2 другого двигателя – статической, то параллельная работа возможна за счет регулятора второго двигателя (рис. 13, а). Тогда необходимо задавать значение загрузки генератора в зависимости от мощности нагрузки. В случае двух астатических характеристик двигателей, имеющих различный статизм [16], нагрузка будет распределяться не равномерно (рис. 13, б). Для получения одинаковой загрузки генераторов также необходима система распределения, которая будет воздействовать на положение топливных реек ТНВД двигателей.

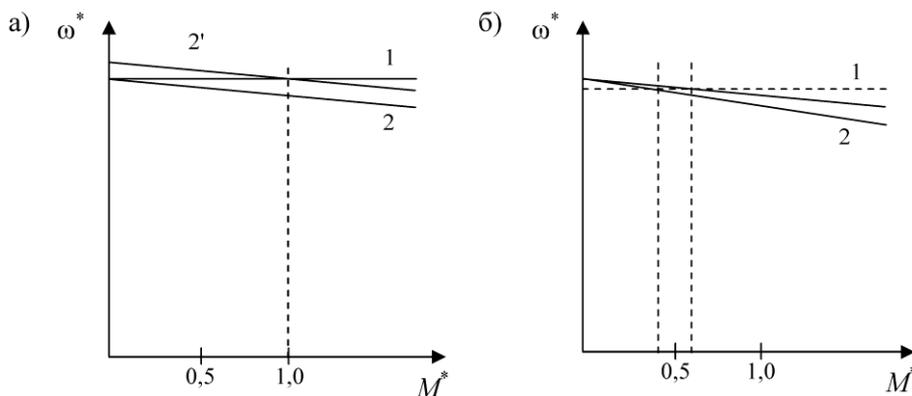


Рис. 13. Механические характеристики двигателей:

а) для 1-го – статическая, для 2-го – астатическая; б) для 1-го и 2-го – астатические.

Следует отметить, что электронные системы регулирования частоты вращения, установленные на двигатели, успешно выполняют запуск всех четырех машин, составляющих судовую электростанцию. Экспериментально было установлено, что при точной настройке регуляторов механические характеристики двигателей (см. рис. 2, характеристики 2) обладают одинаковым статизмом при загрузке генераторов до номинальной мощности. Исследование работы электростанции на судовые потребители подтвердило правильность технических решений, а оценка динамических характеристик показала лучшую устойчивость в работе ДГ, повышенное быстродействие и точность при набросе и сбросе нагрузки.

Важно учитывать, что канал регулирования активной мощности ДГ возможно настроить на устойчивую работу только в случае равномерного распределения реактивной мощности. Иначе, как показали эксперименты, параллельная работа ДГ является неустойчивой, что приводит к отключению генераторов.

Заключение

Длительная эксплуатация электронных систем регулирования частоты вращения двигателей показала их высокую надежность при минимальных эксплуатационных расходах. Электронные системы по сравнению с механическими регуляторами, которые необходимо периодически настраивать на специальном стенде, что влечет за собой их снятие, транспортировку и установку на штатное место насосов ТНВД, имеют минимальные эксплуатационные расходы. Как правило, обслуживание таких систем заключается в замене подшипников актуаторов и чистке поверхностей датчиков.

Экспериментальные исследования и опыт эксплуатации в течение всей навигации доказали актуальность модернизации систем регулирования скорости вращения вала вспомогательных двигателей.

Литература

1. Российский Речной Регистр. Правила классификации и постройки судов Часть VI электрическое оборудование.
2. Алексеев Н. А. Особенности выбора способа управления резервными агрегатами судовой электростанции в зависимости от нагрузки на шинах главного распределительного щита / Н. А. Алексеев, А. А. Виноградов // Сборник научных трудов профессорско-преподавательского состава Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2016. — С. 7–13.
3. Алексеев Н. А. Особенности синхронизации судовых генераторов в микропроцессорной системе DELOMATIC / Н. А. Алексеев, А. Н. Дуксин // Тезисы докладов научно-технической конференции ППС, научных сотрудников и курсантов. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2008. — С. 193–196.
4. Виноградов А. А. Исследование распределения нагрузки судовых дизель-генераторных агрегатов при их параллельной работе / Андрей Александрович Виноградов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. - 2017. - №2(42). - С. 373-379. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-373-379
5. Григорьев А. В. Повышение эффективности эксплуатации судовых дизельных электростанций / А. В. Григорьев, В. Ю. Колесниченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. - 2014. – №6(28). – С. 39-43. DOI: 10.21821/2309-5180-2014-6-6-39-43.
6. Коробко Г.И., Попов С.В., Бишлетов А.В. Система автоматической загрузки генератора при работе параллельно с сетью: Труды НГТУ «Актуальные проблемы электроэнергетики». Юбилейный том, посвященный 100-летию со дня рождения В.И. Плескова. Том 70., НГТУ, Н.Новгород, 2008, с. 123-125.
7. Sørfon, I. Power Management Control of Electrical Propulsion Systems. In Proceedings of the Dynamic Positioning Conference, Houston, TX, USA, 9–10 October 2012.

8. Radan, D. Integrated Control of Marine Electrical Power Systems. Ph.D. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2008.
9. J M Prousalidis, E Xanthopoulos & K Voutzoulidis (2009) Reactive power sharing in ship energy systems with shaft generators, *Journal of Marine Engineering & Technology*, 8:1, 21-38, DOI: 10.1080/20464177.2009.11020216
10. Fuchs E. Power Quality in Power Systems and Electrical Machines / E. Fuchs, M. A. S. Masoum. — Second edition. — Academic Press, 2015. — 1140 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-800782-2.09989-9.
11. IEEE Power Engineering Society. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies; IEEE Power Engineering Society: Piscataway, NJ, USA, 2005.
12. Radan, D.; Johansen, T.A.; Sorensen, A.J.; Adnanes, A.K. Optimization of load dependent start tables in marine power management systems with blackout prevention. *Trans. Circuits Syst.* 2005, 4, 1861–1866.
13. Коробко Г.И., Попов С.В., Бишлетов А.В. Исследование элементов судовой электростанции на базе макета дизель-генераторной установки: Международный научно-промышленный форум «Великие реки – 2009». Труды конгресса. Том 2. Н.Новгород: Нижегород. гос. архит.-строит. ун. – Н.Новгород: НГАСУ, 2010. – с. 552-555.
14. Коробко Г.И., Попов С.В., Бишлетов А.В. Алгоритм управления автономной электростанцией при параллельной работе с сетью ограниченной мощности. 13 Международный научно-промышленный форум «Великие реки – 2011». Труды конгресса. Н.Новгород: Изд-во ФБОУ ВПО «ВГАВТ», 2012. – с. 262-266.
15. Попов С.В., Бурда Е.М. «Обеспечение нагрузки электрической мощностью в условиях ограниченной мощности сети». Материалы НТК «Актуальные проблемы электроэнергетики», НГТУ, Н.Новгород, 2015, - с. 8-11.
16. Brown N, "Synchronous Generator Case Study", IEE Residential course on Electrical Generators, 1999/2001.

References

1. Rossijskij Rechnoj Registr. Pravila klassifikacii i postrojki sudov CHast' VI elektricheskoe oborudovanie.
2. Alekseev N. A. Osobennosti vybora sposoba upravleniya rezervnymi agregatami sudovoj elektrostancii v zavisimosti ot nagruzki na shinah glavnogo raspredelitel'nogo shechita / N. A. Alekseev, A. A. Vinogradov // *Sbornik nauchnyh trudov professorsko-prepodavatel'skogo sostava Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova.* — SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2016. — S. 7–13.
3. Alekseev N. A. Osobennosti sinhronizacii sudovyh generatorov v mikroprocessornoj sisteme DELOMATIC / N. A. Alekseev, A. N. Duxin // *Tezisy dokladov nauchno-tekhniczeskoj konferencii PPS, nauchnyh sotrudnikov i kursantov.* — SPb.: GMA im. adm. S. O. Makarova, 2008. — S. 193–196.
4. Vinogradov A. A. Issledovanie raspredeleniya nagruzki sudovyh dizel'-generatornyh agregatov pri ih paralel'noj rabote / Andrej Aleksandrovich Vinogradov // *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova.* - 2017. - №2(42). - С. 373-379. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-373-379
5. Grigor'ev A. V. Povyshenie effektivnosti ekspluatacii sudovyh dizel'nyh elektrostancij / A. V. Grigor'ev, V. YU. Kolesnichenko // *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova.* - 2014. – №6(28). – С. 39-43. DOI: 10.21821/2309-5180-2014-6-6-39-43.
6. Korobko G.I., Popov S.V., Bishletov A.V. Sistema avtomaticheskoy zagruzki generatora pri rabote paralel'no s set'yu: Trudy NGTU «Aktual'nye problemy elektroenergetiki». YUbilejnyj tom, posvyashchennyj 100-letiyu so dnya rozhdeniya V.I. Pleskova. Tom 70., NGTU, N.Novgorod, 2008, s. 123-125.
7. Sorfon, I. Power Management Control of Electrical Propulsion Systems. In Proceedings of the Dynamic Positioning Conference, Houston, TX, USA, 9–10 October 2012.
8. Radan, D. Integrated Control of Marine Electrical Power Systems. Ph.D. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2008.

9. J M Prousalidis, E Xanthopoulos & K Voutzoulidis (2009) Reactive power sharing in ship energy systems with shaft generators, *Journal of Marine Engineering & Technology*, 8:1, 21-38, DOI: 10.1080/20464177.2009.11020216
10. Fuchs E. *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines* / E. Fuchs, M. A. S. Masoum. — Second edition. — Academic Press, 2015. — 1140 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-800782-2.09989-9.
11. IEEE Power Engineering Society. *IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*; IEEE Power Engineering Society: Piscataway, NJ, USA, 2005.
12. Radan, D.; Johansen, T.A.; Sorensen, A.J.; Adnanes, A.K. Optimization of load dependent start tables in marine power management systems with blackout prevention. *Trans. Circuits Syst.* 2005, 4, 1861–1866.
13. Korobko G.I., Popov S.V., Bishletov A.V. Issledovanie elementov sudovoj elektrostancii na baze maketa dizel'-generatornoj ustanovki: Mezhdunarodnyj nauchno-promyshlennyj forum «Velikie reki – 2009». *Trudy kongressa. Tom 2. N.Novgorod: Nizhegorod. gos. arhit.-stroit. un. – N.Novgorod: NGASU, 2010. – s. 552-555.*
14. Korobko G.I., Popov S.V., Bishletov A.V. Algoritm upravleniya avtonomnoj elektrostanciej pri parallel'noj rabote s set'yu ogranichennoj moshchnosti. 13 Mezhdunarodnyj nauchno-promyshlennyj forum «Velikie reki – 2011». *Trudy kongressa. N.Novgorod: Izd-vo FBOU VPO «VGAVT», 2012. – s. 262-266.*
15. Popov S.V., Burda E.M. «Obespechenie nagruzki elektricheskoy moshchnost'yu v usloviyah ogranichennoj moshchnosti seti». *Materialy NTK «Aktual'nye problemy elektroenergetiki», NGTU, N.Novgorod, 2015, - s. 8-11.*
16. Brown N, "Synchronous Generator Case Study", IEE Residential course on Electrical Generators, 1999/2001.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Попов Сергей Васильевич, к.т.н., доцент, доцент кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: Popovsev3@ya.ru

Sergey V. Popov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Water Transport Objects, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951,

Бурмакин Олег Анатольевич, к.т.н., доцент, доцент кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: boa_71@mail.ru

Oleg A. Burmakin, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Water Transport Objects, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951.

Мальшев Юрий Сергеевич, к.т.н., доцент, доцент кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: elektrikasp@mail.ru

Yuriy S. Malyshev, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Water Transport Objects, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951.

Статья поступила в редакцию 01.02.2021; опубликована онлайн 23.03.2021.
Received 01.02.2021; published online 23.03.2021.

ЭКОНОМИКА, ЛОГИСТИКА И МЕНЕДЖМЕНТ НА ТРАНСПОРТЕ

УДК 656.078

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi66.151>

Пути совершенствования системы электронного таможенного декларирования в Казахстане

Ж.К. Кегенбеков¹

А.В. Змановский¹

¹*Казахстанско-Немецкий Университет, г. Алматы, Казахстан*

Аннотация. В статье рассмотрены проблемы системы электронного таможенного декларирования в Казахстане, а также ее влияние на транспортный комплекс республики. Объектом исследования является таможенная информационная система «АСТАНА-1», предметом является непосредственно сам процесс электронного таможенного декларирования. Значимость исследования заключается в необходимости определения направлений совершенствования качества и скорости проводимого таможенного контроля над прибывающими на территорию Казахстана грузами. Теоретическую основу исследования составили такие методы, как наблюдение, анализ, синтез, метод экспертных оценок. Вывод, полученный в результате исследования, заключается в определении рекомендаций по модернизации технического уровня ИС «АСТАНА-1» для упрощения и ускорения процессов электронного таможенного декларирования.

Ключевые слова: таможенное декларирование, процедура, информационная система, транспорт, контроль, логистика, управление рисками.

Ways to improve the electronic customs declaration system in Kazakhstan

Zh.K. Kegenbekov¹

A.V. Zmanovskiy¹

¹*Kazakh-German University, Almaty, Kazakhstan*

Abstract. The article discusses the problems of the electronic customs declaration system in Kazakhstan, as well as its impact on the transport complex of the republic. The object of the research is the customs information system "ASTANA-1", the subject is the process of electronic customs declaration. The importance of the study lies in the need to determine the directions for improving the customs control quality and speed over the goods arriving in Kazakhstan. The theoretical basis of the research was formed by such methods as observation, analysis, synthesis, and the method of expert assessments. The conclusion obtained as the result of the study is to identify recommendations for the IS "ASTANA-1 technical level modernization " to simplify and speed up the processes of electronic customs declaration.

Keywords: customs declaration, procedure, information system, transport, control, logistics, risk management t.

Введение

Реформы по совершенствованию и улучшению таможенной системы в Казахстане проводились с первых лет обретения независимости. Они сопровождаются процессами внедрения новых IT-технологий, а также стремлением к полной автоматизации работы таможенных служб [1].

В Республике Казахстан в 2018 году было впервые реализовано и внедрено электронное таможенное декларирование. Электронное декларирование даёт возможность участникам ВЭД подать таможенную декларацию, не выходя из дома или офиса и из любой точки мира, при наличии логина и электронно-цифровой подписи. Новая информационная система (ИС) «АСТАНА-1» разработана в соответствии с нормами ВТО, международными стандартами и передовой практикой, призвана способствовать сокращению количества документов для экспорта и импорта, а также времени их обработки, другими словами, упростить таможенные формальности.

Проведение электронного таможенного декларирования товаров, в свою очередь, значительно повышает эффективность работы транспорта, улучшая такие показатели, как скорость доставки и грузооборот.

Работа исходит из гипотезы, что для совершенствования системы электронного таможенного декларирования необходимо модернизировать технический уровень информационной системы для упрощения процессов декларирования.

Цель – определить направления совершенствования уровня технического развития ИС «АСТАНА-1» для упрощения проведения процессов таможенного декларирования.

Задачи:

- изучить ключевые особенности системы электронного таможенного декларирования в Казахстане;
- выявить сложности, возникающие при проведении электронного таможенного декларирования;
- разработать рекомендации по совершенствованию информационной системы электронного таможенного декларирования.

1. Особенности системы электронного таможенного декларирования в Казахстане

Начальные предпосылки по разработке системы электронного таможенного декларирования в Казахстане возникли в рамках 38-го шага Плана нации «100 конкретных шагов» в 2015 году [2].

Затем, в рамках Кодекса Республики Казахстан «О таможенном регулировании в Республике Казахстан», была выработана нормативно-правовая основа для реализации таможенных операций таможенными органами, используя информационные системы и современные IT-технологии, при этом исключая физическое участие должностных лиц таможенных органов в этом процессе [3].

С началом использования информационной системы Комитета государственных доходов Министерства Финансов Республики Казахстан «АСТАНА-1» появилась возможность проведения автоматизированного контроля над всеми таможенными процессами, начиная от подачи предварительной информации о грузе, использования системы управления рисками (СУР), оформления транзитных деклараций на товары, хранения товаров на складах временного хранения (СВХ), заканчивая проведением контроля товаров после выпуска [4].

ИС «АСТАНА-1» представляет из себя комплексную и многофункциональную систему. 1 октября 2017 года была внедрена в опытное пользование подсистема "Таможенный транзит" ИС «АСТАНА-1», которая могла обеспечить исполнение некоторых таможенных операций с грузами в пунктах пропуски на таможенной

границе, а именно: заблаговременное информирование о статусе груза, использование технических средств контроля, контроль за деятельностью других госорганов, различные таможенные процедуры, связанные с транспортировкой транзитных грузов.

1 января 2018 года в опытное пользование была внедрена подсистема "Таможенное декларирование" по таможенным процедурам, связанным с экспортом товаров. В данной системе прошло оформление более чем 24 тысяч деклараций на грузы, из них 99,4% были выпущены системой в автоматическом режиме. Среднее время оформления составило одну минуту [5].

В полную эксплуатацию подсистема «Таможенное декларирование» по всем таможенным процедурам была внедрена 1 апреля 2018 года. ИС «АСТАНА-1» реализована в соответствии со всеми нормами и правилами Всемирной торговой организации, а также международными стандартами. Система предназначена для сокращения количества бумажной документации, уменьшения времени, требуемого для обработки информации и упрощения проведения таможенных формальностей [5].

Осуществление таможенных операций и формальностей без необходимости участия таможенного инспектора, исключение необходимости в физическом присутствии декларанта в таможенных органах, предъявление документов в электронном формате доказывают реализацию в нашей стране системы электронного таможенного регулирования.

Основные принципы, которые присущи информационной системе Комитета государственных доходов МФ РК «АСТАНА-1» следующие:

- безостановочная работа в системе с момента заполнения таможенной декларации до конечного ее анализа системой;
- общая модель используемых данных;
- единая база бизнес-процессов;
- единое хранилище форм всей используемой документации;
- общий архив документации;
- единые механизмы, обеспечивающие контакты с внешними системами [6].

Переход на систему электронного декларирования повысил эффективность деятельности не только организаций, которые ведут ВЭД, но и всех таможенных органов. Сотрудникам таможенных органов была предоставлена возможность анализировать большое количество информации о грузах за меньшее время. Это дало возможность значительно уменьшить время выпуска товаров, так как ИС «АСТАНА-1» проверяет всю информацию о грузе в автоматическом режиме без участия таможенного инспектора [7].

Система электронного таможенного декларирования обладает рядом особенностей и преимуществ относительно механизма проведения традиционного декларирования. К основным преимуществам, которыми обладает система электронного таможенного декларирования, можно отнести следующие:

- исключение прямого контакта таможенного инспектора и декларанта, сотрудничество осуществляется путем использования ИС «АСТАНА-1»;
- уменьшение коррупционных рисков;
- месторасположение декларанта неважно для проведения декларирования, так как грузы при этом помещаются на приграничных терминалах, что значительно минимизирует расходы на логистику внешнеторговых грузов;
- централизация процесса осуществления контроля над таможенной стоимостью грузов, что приводит к единообразию ценовой политики при декларировании;
- значительное уменьшение времени, требуемого для проверки документации и информации о грузе;

- возможность обеспечения единства и правомерности всех принимаемых решений;
- осуществление оптимизация штатной численности персонала таможенных органов;
- единая технологическая платформа на базе электронного декларирования;
- получение выпуска на груз в полностью автоматическом режиме;
- наличие у участников ВЭД единого лицевого счета и снятие с него средств для оплаты таможенных платежей и налогов в бюджет;
- возможность превращения одного таможенного документа в другой в автоматическом режиме;
- открытость всех проводимых в онлайн-режиме операций для всех участников ВЭД и таможенных органов;
- вследствие ускорения проведения таможенного декларирования, повышается грузопоток импортных товаров, предоставляя возможность для расширения и совершенствования логистической системы Казахстана;
- возможность обратной связи с помощью отправки участнику ВЭД информации обо всех статусах груза [8].

Делая выводы, можно сказать, что система электронного таможенного декларирования в Казахстане прошла все стадии развития и в настоящее время эффективно функционирует ИС «АСТАНА-1» имеет особенности, позволяющие ускорить проведение таможенного декларирования грузов, прибывающих на территорию Казахстана.

2. Сложности, возникающие при проведении электронного таможенного декларирования

С момента начала использования электронного таможенного декларирования таможенный контроль начал проводиться на основе СУР. Это значительно уменьшило воздействие человеческого фактора на получение решения в отношении таможенного оформления грузов [9].

В процессе осуществления таможенного контроля таможенные органы опираются на принцип выборочности объектов, подлежащих таможенному контролю, различных форм таможенного контроля, а также мер, которые обеспечивают прохождение контроля. При выборе объектов, подлежащих таможенному контролю, форм таможенного контроля, а также мер, которые делают возможным проведение таможенного контроля, широко задействуется СУР.

Исполнение процесса по управлению рисками производится органами таможни в порядке, который определен специальным уполномоченным органом [10].

Данные, которые располагаются в индикаторах и профилях риска, являются засекреченными кроме случаев, которые устанавливаются законодательством Казахстана, а также за исключением данных индикаторов:

- 1) факт привлечения к административной или уголовной ответственности за несоблюдение мер таможенного законодательства Республики Казахстан;
- 2) присутствие задолженности по различным таможенным налогам, платежам и пошлинам [3].

Для того, чтобы дифференцировать использование мер по минимизации рисков, органы таможни вправе выполнять классификацию лиц, которые совершают различные таможенные операции, с помощью разделения их на категории низкого, среднего, а также высокого уровня риска.

Стратегия использования СУР в органах, осуществляющих учет государственных доходов, ориентирована на достижение следующих главных целей:

- поиск областей риска, имеющих большой шанс возникновения возможного нарушения таможенного законодательства Евразийского экономического союза и Республики Казахстан;

- создание и использование необходимых мер по уменьшению доли рисков;

- проведение результативного выбора объектов таможенного контроля, а также различных форм таможенного контроля;

- концентрация внимания особенно на областях риска с высоким уровнем, а также результативное использование имеющихся ресурсов органов государственных доходов;

- организация условий для повышения скорости и значительного упрощения передвижения грузов через таможенную границу Евразийского экономического союза [11].

При проведении таможенного контроля СУР может отправить груз в четыре различных коридора.

В зеленый коридор отправляются декларации, по которым не было выявлено рисков. Выпуск деклараций такого рода производится системой в автоматическом режиме, при этом нет необходимости участия в процессе должностного лица. Грузы, выпущенные по зеленому коридору, могут в тот же момент покидать таможенный пост и быть транспортированы до конечного места назначения.

В синий коридор попадают такие декларации, в отношении которых требуется проведение таможенного контроля после выпуска груза. При отправке декларации в синий коридор системой предполагается автоматический выпуск груза. Товары, попавшие в синий коридор, также разрешается транспортировать до конечного пункта.

В желтый коридор попадают декларации, для которых предусмотрено осуществление процедуры по проверке документов на груз, различных сведений о товаре на этапе таможенного оформления. В желтый коридор могут попасть декларации, которые были поданы участниками ВЭД среднего уровня риска и ниже.

В красный коридор попадают декларации, в отношении которых необходимо провести физический контроль, который представляет из себя таможенный досмотр груза таможенным инспектором, а также при необходимости проведение таможенной экспертизы на этапе таможенного оформления груза. В красный коридор могут попасть декларации, которые подают участники ВЭД высокого уровня риска [12].

Товары, которые попали в желтый и красный коридоры, не могут быть транспортированы с таможенного поста до конечного пункта назначения до проведения полной их проверки таможенным инспектором.

Несмотря на все преимущества системы электронного таможенного декларирования, также существуют определенные сложности, в свою очередь ограничивающие эффективность и скорость проведения электронного декларирования.

Основные недостатки ИС «АСТАНА-1», возникающие при проведении таможенного декларирования, можно рассмотреть на примере компании ТОО «ДХЛ Интернешнл Казахстан»:

1. Частичное внедрение в информационную систему различных форм таможенного декларирования.

В настоящее время в системе существует только одна форма электронного декларирования – декларация на товары стоимостью свыше 200 EUR. До сих пор нет механизмов, которые позволили бы проводить таможенную очистку грузов до 200 EUR по заявлению на товары, грузов физических лиц для личного пользования по пассажирской таможенной декларации (ПТД), а также грузов физических лиц для личного пользования с превышением лимита в 200 EUR по стоимости с оформлением

по таможенному приходному ордеру (ТПО). Вышеперечисленные процедуры все еще требуют физического присутствия таможенного представителя компании на таможенном посту.

2. ИС «АСТАНА-1» – это система, требующая глобальной поддержки IT-специалистов для обеспечения бесперебойного функционирования. В текущий момент времени наблюдаются технические неполадки в работе системы, например, случаи, когда участники ВЭД в течение всего дня не могут зарегистрировать свои декларации на товары.

Сложности декларирования в ИС заключаются как в сбоях работы серверного оборудования, так и в периодических задержках обновления информации в системе. Товарные позиции декларируемых товаров зачастую бывают разнообразны, в том числе встречается скоропортящаяся продукция, а любая задержка по причине неработоспособности ИС может привести к порче, затратам по простоям или несвоевременному закрытию таможенных процедур. Декларанты компании напрямую зависят от технических аспектов, обеспечивающих эксплуатацию системы [13].

3. В случаях, когда СУР в ИС «АСТАНА-1» направляет декларацию по желтому или красному коридорам, возникает необходимость проверки груза таможенным инспектором. В будущем очень важно минимизировать возможность внедрения в процесс отработки профиля риска и процесса выпуска декларации таможенного инспектора, это также относится к вопросам по противодействию коррупции [14].

4. Отсутствие упрощенного доступа к электронному декларированию. В данный момент каждый декларант в компании для того, чтобы запустить декларацию в ИС, предварительно должен инициировать запрос департаменту государственных доходов, а также запросить активацию в ИС «АСТАНА-1» как участника ВЭД. На обработку данного запроса также уходит время [15].

5. ИС «АСТАНА-1» имеет ряд недостатков в части технических возможностей, таких как:

- невозможность сохранения декларации на товары на середине набора;
- нередко возникающие перезагрузки ИС.

По этим причинам декларанты компании вынуждены использовать сторонний брокерский софт, коммерческое ПО, в котором полностью набирается декларация, после этого в готовом виде загружается в ИС «АСТАНА-1».

6. Отсутствие грамотного методического пособия, а также поэтапной инструкции, закрепленной на законодательном уровне, по которым можно было бы работать в ИС.

Делая вывод, можно сказать что несмотря на множество преимуществ, ИС «АСТАНА-1» имеет определенное количество недостатков, которые затрудняют и замедляют процесс проведения электронного таможенного декларирования.

3. Рекомендации по совершенствованию информационной системы электронного таможенного декларирования

Для участников ВЭД предусмотрено дальнейшее упрощение таможенных процедур через информационную систему осуществления экспортно-импортных операций «Единое окно» [11].

Портал «Единое окно» предоставит участникам ВЭД возможность подавать документы, которые необходимы для осуществления экспортно-импортных операций, в унифицированной форме, используя единую точку входа.

Портал «Единое окно» связывает более 13 информационных ресурсов, в число которых входят ИС «АСТАНА-1», государственная база данных (ГБД) «Е-лицензирование», а также разного рода реестры и другие системы, данные из которых нужны для реализации таможенных операций.

Портал обеспечивает наличие условий, при которых участникам ВЭД нет необходимости собирать разрешительные документы по разным инстанциям.

Пользуясь порталом «Единое окно», участники ВЭД имеют возможность получить данные услуги в электронном формате более чем из 10 государственных органов [16].

Документация на портале может выдаваться как государственными органами, так и аккредитованными организациями. Сертификаты соответствия на груз, например, смогут быть выданы аккредитованными лабораториями, осуществляющими работу в «Едином окне». Также на портале есть возможность по оказанию услуг в сфере таможенного регулирования [17].

Можно предложить следующие рекомендации по совершенствованию системы электронного таможенного декларирования в Казахстане:

- необходимо постепенно внедрить в информационную систему таможенных органов «АСТАНА-1» все существующие формы таможенного декларирования, а именно: заявление на товары, прибывшие в адрес юридических лиц стоимостью до 200 EUR, ПТД на грузы физических лиц для личного пользования, ТПО на грузы физических лиц для личного пользования с превышением лимита беспошлинного ввоза по стоимости в 200 EUR;

- необходимо оказывать всестороннюю поддержку со стороны казахстанских IT-специалистов для обеспечения бесперебойного функционирования ИС «АСТАНА-1»;

- следует провести модернизацию возможностей ИС «АСТАНА-1» для полного предотвращения физического досмотра груза таможенным инспектором;

- необходимо организовать свободный доступ всем налогоплательщикам к системе для просмотра интересующих их сведений о грузе;

- нужно провести совершенствование технического уровня ИС «АСТАНА-1» для упрощения процессов декларирования;

- МФ РК необходимо разработать грамотное методическое пособие и поэтапную инструкцию, закрепленную на законодательном уровне, по которым можно будет полноценно работать в ИС «АСТАНА-1».

Исходя из указанных выше рекомендаций, можно прийти к выводу, что для улучшения качества проведения электронного таможенного декларирования товаров необходимо провести модернизацию технических возможностей ИС «АСТАНА-1», добавить в систему новые формы таможенного декларирования, также важно оказывать постоянную поддержку системе со стороны IT-специалистов для организации бесперебойной работы системы.

Заключение

В настоящее время в Казахстане активно используется и совершенствуется система электронного таможенного декларирования ИС «АСТАНА-1». Переход на систему электронного декларирования дал возможность повышения эффективности деятельности не только организаций, которые ведут внешнюю торговую деятельность, но и таможенных органов.

Благодаря отсутствию человеческого фактора при осуществлении таможенного контроля появляется возможность значительно минимизировать коррупционные проявления, повышается прозрачность операций и действий, совершаемых таможенными органами [18].

Система электронного таможенного декларирования позволяет активно развиваться транспортному комплексу и логистической системе Казахстана. В связи с большой скоростью декларирования товаров появляется возможность транспортировки как импортных, так и экспортных грузов в еще больших масштабах, соответственно повышается грузопоток, возникает необходимость использования различных видов транспорта.

При проведении электронного таможенного декларирования возникает ряд сложностей, которые препятствуют автоматизации и ускорению процесса.

На примере компании ТОО «ДХЛ Интернешнл Казахстан» можно увидеть, что проблемы ИС «АСТАНА-1» пытаются решить на локальном уровне, однако для улучшения качества и эффективности проведения электронного таможенного декларирования товаров необходимо провести модернизацию технических возможностей ИС «АСТАНА-1» на глобальном уровне, а именно: добавить в систему новые формы таможенного декларирования, оказывать постоянную поддержку системы со стороны IT-специалистов для организации бесперебойной работы системы, разработать грамотное поэтапное руководство по работе в системе.

Литература

1. Georgieva E. A. et al. Prospects for the development of the digital economy in Kazakhstan //Central Asian Journal of Social Sciences and Humanities. – 2020. – Т. 6. – №. 1. – С. 54-62.
2. Назарбаев Н.А. План нации - 100 конкретных шагов. Программа Президента Республики Казахстан от 20 мая 2015 года. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://adilet.zan.kz/rus/docs/K1500000100> (дата обращения: 02.11.2020).
3. Республика Казахстан. Кодекс от 26 декабря 2017 года № 123-VI ЗРК «О таможенном регулировании в Республике Казахстан» (с изменениями и дополнениями по состоянию на 25.06.2020 г.) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://adilet.zan.kz/rus/docs/K1700000123> (дата обращения: 15.11.2020).
4. Sembiyeva L.M. et al. Strategy and tactics of financial policy of Kazakhstan in the conditions of development of integration processes //Bulletin of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Almaty. – 2019. – №. 5. – С. 87-96.
5. Налоги в Казахстане. Электронное декларирование ИС «Астана-1» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://nalogikz.kz/docs/yelektronnoe-deklarirovanie-is-astana-1-2.html> (дата обращения: 29.11.2020).
6. Ворона А.А. Повышение качества предоставления таможенных услуг в центрах электронного декларирования //Петербургский экономический журнал. – 2019. – №. 2.
7. Косых Е.А., Кондрусик М.А., Старых С.А. Анализ кадрового обеспечения и возможностей карьерного роста сотрудников таможенных органов //Актуальные проблемы развития социально-экономических систем: теория и практика. – 2018. – С. 29-33.
8. Shkvarya L. et al. The impact of the Customs Union and the EAEU on the small and medium business in Kazakhstan //Central Asia & the Caucasus – 2017. – Т. 18. – №. 1.
9. Yakovleva M.A. Electronic Customs as a Currency Control Authority //2nd International Scientific and Practical Conference on Digital Economy (ISCDE 2020). – Atlantis Press, 2020. – С. 246-249.
10. Sheryazdanova G., Butterfield J. E-government as an anti-corruption strategy in Kazakhstan //Journal of Information Technology & Politics. – 2017. – Т. 14. – №. 1. – С. 83-94.
11. Фещенко Е.А. Автоматизация таможенного дела в странах ЕАЭС //Актуальные вопросы науки и практики. – 2020. – С. 71-76.
12. Бондарева А.В., Николаенко Т.О. Применение системы управления рисками при контроле таможенной стоимости товаров //Актуальные вопросы развития современного общества. – 2019. – С. 53-56.
13. Зюзько Д.А. Механизм «Единого окна» и его реализация в Евразийском экономическом союзе. – 2019.
14. Игнатьева Г.В., Алёхина О.В. Перспективы и риски цифровых технологий в таможенном деле //Экономическая безопасность и качество. – 2018. – №. 1 (30).
15. Turuntayeva A. et al. Improving the effectiveness of tax administration through the example of the republic of Kazakhstan //Journal of Legal, Ethical and Regulatory Issues. – 2019. – Т. 22. – №. 2. – С. 1-16.
16. Прокопьева М.Н. Развитие электронных систем платежей в целях внедрения механизма "единого окна" в Евразийском Экономическом Союзе //Экономика. Право. Инновации. – 2018. – №. 5. – С. 29-35.
17. Алёхина О.В. и др. Цифровые технологии в таможенном деле //Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета. – 2018. – №. 3 (72).
18. Smolina E.S., Seryomina R.N. Prospects for the Functioning of the New Customs Code of the Eurasian Economic Union //Sustainable Growth and Development of Economic Systems. – Springer, Cham, 2019. – С. 77-85.

References

1. Georgieva E. A. et al. "Prospects for the development of the digital economy in Kazakhstan" *Central Asian Journal of Social Sciences and Humanities*. 6.1 (2020): 54-62.
2. Nazarbaev N.A. Plan nacji. 100 konkretnykh shagov. Programma Prezidenta Respubliki Kazakhstan ot 20 maya 2015 goda. Web. 2 Nov. 2020 <<http://adilet.zan.kz/rus/docs/K150000100>>
3. Respublika Kazakhstan. Kodeks ot 26 dekabrya 2017 goda № 123.VI ZRK O tamozhennom regulirovanii v Respublike Kazakhstan (s izmeneniyami i dopolneniyami po sostoyaniyu na 25.06.2020 g.). Web. 15 Nov. 2020 <<http://adilet.zan.kz/rus/docs/K1700000123>>
4. Sembiyeva L.M. et al. "Strategy and tactics of financial policy of Kazakhstan in the conditions of development of integration processes" *Bulletin of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*. Almaty. 5. (2019): 87-96.
5. Nalogi v Kazakhstane. Elektronnoye deklarirovaniye IS «Astana-1» Web. 29 Nov. 2020 <<https://nalogikz.kz/docs/yelektronnoe-deklarirovanie-is-astana-1-2.htm>>
6. Vorona A.A. "Povysheniye kachestva predostavleniya tamozhennykh uslug v tsentrakh elektronnoy deklarirovaniya" (Improving the quality of the provision of customs services in the centers of electronic declaration) *Peterburgskiy ekonomicheskij zhurnal* 2 (2020).
7. Kosykh Ye.A., Kondrusik M.A., Starykh S.A. "Analiz kadrovogo obespecheniya i vozmozhnostey kar'yernogo rosta sotrudnikov tamozhennykh organov" (Analysis of staffing and career opportunities for customs officials) *Aktual'nyye problemy razvitiya sotsial'no-ekonomicheskikh sistem: teoriya i praktika*. (2018): 29-33.
8. Shkvarya L. et al. "The impact of the Customs Union and the EAEU on the small and medium business in Kazakhstan" *Central Asia & the Caucasus* 18.1 (2017).
9. Yakovleva M.A. "Electronic Customs as a Currency Control Authority" 2nd International Scientific and Practical Conference on Digital Economy (ISCDE 2020). Atlantis Press. (2020): 246-249.
10. Sheryazdanova G., Butterfield J. "E-government as an anti-corruption strategy in Kazakhstan" *Journal of Information Technology & Politics*. 14.1 (2017): 83-94.
11. Feshchenko Ye.A. "Avtomatizatsiya tamozhennogo dela v stranakh EAES" (Automation of customs affairs in the EAEU countries) *Topical issues of science and practice*. (2020): 71-76.
12. Bondareva A.V., Nikolayenko T.O. "Primeneniye sistemy upravleniya riskami pri kontrole tamozhennoy stoimosti tovarov" (Application of the risk management system in the control of the customs value of goods) *Actual problems of the development of modern society*. (2019): 53-56.
13. Zyuz'ko D.A. *Mekhanizm «Yedinogo okna» i yego realizatsiya v Yevraziyskom ekonomicheskom soyuze*. 2019.
14. Ignat'yeva G.V., Alokina O.V. "Perspektivy i riski tsifrovyykh tekhnologiy v tamozhennom dele" (Prospects and risks of digital technologies in customs) *Ekonomicheskaya bezopasnost' i kachestvo*. 1.30 (2018)
15. Turuntayeva A. et al. "Improving the effectiveness of tax administration through the example of the republic of Kazakhstan" *Journal of Legal, Ethical and Regulatory Issues*. 22.2 (2019): 1-16.
16. Prokop'yeva M.N. "Razvitiye elektronnykh sistem platezhey v tselyakh vnedreniya mekhanizma "yedinogo okna" v Yevraziyskom Ekonomicheskom Soyuze" (Development of electronic payment systems in order to introduce a single window mechanism in the Eurasian Economic Union) *Ekonomika. Pravo. Innovatsii*. 5 (2018): 29-35
17. Alokina O.V. i dr. "Tsifrovyye tekhnologii v tamozhennom dele" (Digital technologies in customs) *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo sotsial'no-ekonomicheskogo universiteta*. 3.72 (2018)
18. Smolina E.S., Seryomina R.N. "Prospects for the Functioning of the New Customs Code of the Eurasian Economic Union" *Sustainable Growth and Development of Economic Systems*. Springer, Cham. (2019): 77-85.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Кегенбеков Жандос Кадырханович, к.т.н.,

Zhandos K. Kegenbekov, candidate of

доцент, декан факультета Инжиниринга и информационных технологий, Казахстанско – Немецкий Университет, 050010, г. Алматы, ул. Пушкина 111, e-mail: kegenbekov@dku.kz

Змановский Артем Валидович, магистрант Казахстанско – Немецкого Университета (специальность Ресурсосберегающая производственная логистика), 050010, г. Алматы, ул. Пушкина 111, e-mail: vip.zmanovskiy@mail.ru

technical sciences, Dean of Engineering and Information Technology Faculty, Kazakh – German University, 111 Pushkin str., Almaty, 050010.

Artyom V. Zmanovskiy, Master's student of the Kazakh-German University (specialty Resource-saving production logistics), 111 Pushkin str., Almaty, 050010.

Статья поступила в редакцию 21.12.2021; опубликована онлайн 23.03.2021.
Received 21.12.2021; published online 23.03.2021.

УДК 656.078

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi66.152>

Тенденции развития транспортной инфраструктуры Российской Федерации в свете повышения ее транзитного потенциала

А.В. Троилина

Ростовский государственный экономический университет (РИНХ), г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. В современных рыночных условиях необходимо эффективно использовать транзитный потенциал России, которая занимает выгодное транспортно-географическое положение на пути товаров, перемещаемых из Европы в Азию (и наоборот). Для этого необходимо определить готовность транспортной инфраструктуры государства к оказанию высококачественных услуг мирового уровня, обеспечивающих конкурентные преимущества перед другими маршрутами доставки грузов. В работе исследуются ключевые тенденции развития транспортной инфраструктуры России и обосновываются предложения по совершенствованию транзита товаров (грузов) через ее территорию.

Ключевые слова: транзитная транспортная инфраструктура, инфраструктура транспорта, проблемы функционирования транспорта.

Trends in the development of the transport infrastructure of the Russian Federation in the light of increasing its transit potential

Anna V. Troilina

Rostov State University of Economics

Abstract. In the modern market conditions, it is essential to use the Russian transit potential effectively, as the country occupies a favorable transport and geographical position on the way of goods being moved from Europe to Asia (and vice versa). To do this, it is necessary to determine how ready and adequate the state's transport infrastructure is to provide high-quality world-class services that secure competitive advantages over other cargo delivery routes. In this paper we examine the key trends in the development of the Russian transport infrastructure and substantiates proposals for improving the transit of goods (cargo) through its territory.

Keywords: transit transport infrastructure, transport infrastructure, problems of transport functioning.

Введение

Разработка долгосрочной транспортной стратегии нашей страны явилась крайней необходимостью в сложившихся условиях развития народного хозяйства и интеграции в мирохозяйственные связи, в том числе посредством реализации транзитного потенциала. Проведенный анализ теоретических аспектов позволил заключить, что транспортный сектор имеет важное значение в народном хозяйстве и экономике страны как на внутреннем, так и на международном уровне. Известно, что в среднем его удельный вес в структуре совокупной валовой добавленной стоимости может составлять 7-10%. Одновременно с этим запуск различных проектов,

касающихся строительства и модернизации самой транспортной инфраструктуры страны, оказывает значительное влияние непосредственно на основной капитал [1]. С точки зрения внешнеторговых и внутренних экономических связей, а также коммерческой деятельности, транспорт можно представить в качестве системы, где нормализованное, оптимальное и эффективное развитие инфраструктуры в транспортной системе страны есть основа роста ключевых индикаторов микро- и макроэкономики в целом и коммерческой деятельности хозяйствующих субъектов в частности.

Основная часть

Транспортная отрасль является одной из важнейших и крупнейших отраслей экономики Российской Федерации, для которой в современных условиях рынка важна интернационализация. Несмотря на санкции, она остается серьезным торговым партнером многих стран ЕС. Она интересна, например, немецким логистическим провайдерам по нескольким причинам, среди которых следует учитывать, что внутренний российский транспортный рынок имеет большой потенциал, так как многие российские компании рассматривают возможность предоставления своих транспортных услуг иностранным компаниям [2]. К тому же в настоящий период в России растет оборот онлайн-торговли, требующий расширения высококачественных транспортных услуг. Однако следует отметить и наличие узких мест, и возникновение многогранных проблем при транспортировке грузов. Наряду с неэффективной таможенной политикой особенно остро выделяются проблемы транзитной транспортно-инфраструктурной деятельности на территории Российской Федерации.

Тем не менее Россия находится в выигрышном транспортно-географическом положении на пути товаров, перемещаемых из Европы в Азию (и наоборот) с точки зрения транзитного потенциала, так как она расположена на европейском и азиатском континенте, имеет общую границу с такими странами, как Норвегия, Польша, Финляндия, Эстония, Латвия, Литва, Белоруссия, Украина, Грузия, Азербайджан, Казахстан, Монголия, Северная Корея и Китай. Кроме того, Россия имеет выходы в Северный Ледовитый океан, Атлантику (Черное и Балтийское море) и Тихий океан. Помимо географических есть и особенности развития транспортно-логистических инфраструктур. Последние регулярно оцениваются Всемирным банком с помощью индекса производительности. При этом рассматриваются шесть различных компонентов, оказывающих на него влияние: клиенты, инфраструктура, международные поставки, качество и компетентность, определение местоположения, а также своевременность доставки. Первое место в данном рейтинге за 2016-2018 годы занимает Германия, тогда как Китай занимает 27 место, а Россия – 85 [3].

Необходимо отметить, что цель транспортного обслуживания направлена на удовлетворение запросов клиентов и обеспечивается предоставлением качественных транспортных услуг, при которых товар (груз) должен быть доставлен в хорошем состоянии в нужное время и место. Также следует учитывать формальные цели - оптимальные расходы на транспортные перевозки и операции. Для достижения этих целей используются пространственно-временные процессы трансформации (транспортные, складские и перевалочные процессы). Транспортные процессы относятся к изменению местоположения грузов, а процессы хранения связаны с изменением временной доступности товара, транспортные и складские процессы связаны друг с другом процессами перевалки.

Процессы пространственно-временной трансформации можно исследовать на двух уровнях наблюдения. Микроуровень транспортировки ограничивается системами, которые находятся в рамках одного предприятия или между определенными компаниями. Макроуровень устанавливает для этого рамки, он относится к формированию транспортной инфраструктуры, а также систем экономик.

Транспортная инфраструктура Российской Федерации существенно детерминирует возможности пространственно-временной трансформации процессов и, следовательно, для лиц, участвующих в договоре купли-продажи, является значимым аспектом в контексте перевозки грузов.

В данном случае представляется возможным говорить о наличии транспортной эластичности, которая описывает относительное изменение соотношения между валовым внутренним продуктом (ВВП) и транспортной производительностью (грузооборотом страны) в течение выбранного периода времени. Данный индикатор можно рассчитать по формуле 1[4]

$$Э_{тр} = (\Delta \text{Грузооборот} / \Delta \text{ВВП}) \times (\text{ВВП}_0 / \text{Грузооборот}_0), \quad (1)$$

где, Грузооборот – это объем грузов, перевозимых транспортом (в тоннах) с учетом пройденного расстояния и измеряется в тонно-километрах или тонно-милях.

Транспортная эластичность (в том числе, глобальная) – это безразмерная величина со следующей интерпретацией: если она больше 1, производительность транспорта растет быстрее, чем ВВП. Если транспортная эластичность равна 1, то обе величины изменяются в одинаковой степени. Если транспортная эластичность меньше 1, ВВП растет быстрее, чем производительность транспорта (грузооборот), что характерно для высокоразвитых экономик. Для анализа тенденций в экономике транспортная эластичность обычно сравнивается в течение нескольких лет и, следовательно, зависит от выбранного периода времени.

Еще один важный индикатор – плотность транспортной инфраструктуры ($P_{ти}$) – характеризует состояние транспортных коммуникаций и определяется как значение длины всех транспортных путей (L_{mn} – в км) и всей площади анализируемого государства (S) в квадратных километрах, рассчитываемый по формуле 2.2.[5]

$$P_{ти} = L_{тп} / S, \quad (2)$$

где, $P_{ти}$ – это плотность транспортной инфраструктуры.

Глобальная плотность не фиксирует различия в маршрутах движения, глобальная транспортная эластичность пренебрегает различиями между видами транспорта и поэтому дополнительно дифференцируется в соответствии с транспортными системами и видами транспорта, которые имеют инфраструктуры, обусловленные сферами их использования. Так, при использовании воздушного транспорта грузы перевозятся с высокой скоростью на большие расстояния за короткое время. Тем не менее, данные перевозки являются довольно дорогостоящими, а также требуют создания сети аэропортов (аэродромов), которые в большинстве случаев расположены далеко за чертой населенного пункта, что требует доставки груза получателю дополнительными видами транспорта.

Преимущество автомобильного транспорта заключается в том, что доставка груза может осуществляться от «двери до двери» при наличии развитой системы автодорог и иных объектов инфраструктуры. Тем не менее, грузоподъемность автотранспорта на дорогах России ограничена до 20 т., что является, в ряде случаев, сдерживающим фактором, как и отсутствие высокоразвитых инфраструктур в Сибири и на Дальнем Востоке.

При железнодорожной перевозке грузов осуществляется транспортировка как тарно-штучных грузов, так и массовых грузов: угля, руды, нефтепродуктов и т.д. Данный вид транспорта экономически эффективно применять на больших расстояниях и при значительных объемах грузов. Однако в РФ имеется только одна Транссибирская железнодорожная магистраль, связывающая Дальний Восток с европейской частью государства, что отрицательно влияет на транзитный потенциал

России. Данный вид транспорта требует более эффективного менеджмента и больших инвестиций для поддержания функционирования его инфраструктуры.

Преимущества водного транспорта, обеспечивающего более 60% перевозок внешнеторговых грузов, заключаются в возможности транспортировки их больших объемов при низких затратах. Вместе с тем, инфраструктуры морских портов в связи с наличием объективных (отсутствие инвесторов, неэффективная налоговая политика) и субъективных причин (недостаточно высокий уровень менеджмента) не обеспечивают высокую провозную и пропускную способность в сфере транзитных перевозок.

Необходимо отметить, что интенсивное использование трубопроводного транспорта является еще одной макротранспортной особенностью России, экономика которой ориентирована на экспорт сырья (нефти и газа), что оказывает большое влияние на развитие транспортных инфраструктур видов транспорта, осуществляющих массовые перевозки вышеназванных грузов.

Для более глубокого анализа динамики показателей транспортной эластичности в нашей стране необходимо первоначально исследовать статистические данные и осуществить оценку динамики показателей объемов перевозки и грузооборота в России в целом и - по видам транспорта - в частности.

Так, статистические данные за последние годы свидетельствуют о наличии тенденции роста грузооборота в России по многим видам транспорта, что представлено в аналитической таблице 1, в которой отражены данные по грузообороту по основным видам транспорта за 2015-2019 годы, с охватом данных за 2010 год.

Таблица 1

Объем перевозок по основным видам транспорта в России за 2010, 2015-2019 годы, в млрд. т. [6]

Виды транспорта	Годы						Относительное отклонение, в %		
	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2018/2015	2018/2017	2019/2018
Ж/д транспорт	1,31	1,33	1,33	1,38	1,41	1,28	106,02	102,17	90,8
Автотранспорт	5,24	5,36	5,40	5,40	5,55	5,73	103,54	102,78	103,2
Трубопроводный	1,06	1,07	1,09	1,14	1,17	1,16	109,35	102,63	99,1
Морской	0,04	0,02	0,03	0,03	0,02	0,0185	100,00	66,67	92,5
Внутренний водный	0,10	0,12	0,12	0,12	0,12	0,098	100,00	100,00	81,7
Всего (за исключением воздушного транспорта)	7,75	7,89	7,95	8,07	8,27	8,2865	104,68	102,48	100,2

Исходя из данных таблицы 1, представляется возможным сделать вывод о наличии тенденции роста объема перевозок по основным видам транспорта за исследуемые периоды (объемы перевозок воздушным транспортом не рассматриваются, так как они не представлены в достоверных открытых источниках информации, на момент исследования, что по сути не влияет на результат нашей работы, обеспечивая менее 0,5% грузооборота).

Таким образом, темп роста анализируемого показателя в 2018 году по сравнению с 2017 годом составил 2,48%. Рост в 2018 году по сравнению с 2015 годом составил 4,68%: за счет роста объема перевозок железнодорожным транспортом - на 6,02%,

автотранспортом - на 3,54% и трубопроводным - на 9,35%. За исследуемые периоды фактически не наблюдается роста объемов перевозок водными видами транспорта: 1,7%, составив 8,3 млрд тонн. Анализ данных за 2018-2019 годы показал снижение объемов перевозок в млн. тонн по многим видам транспорта, за исключением автотранспортных и воздушных перевозок: рост 3,2% и 1,1% соответственно. Объем грузопотоков (перевозки в млн. тонн), осуществленных непосредственно морским видом транспорта по отношению к 2018 году показали тенденцию снижения на 7,5% – до 18,5 млн тонн. Несмотря на то, что в таблице 2.1 мы не рассматривали показатели объемов перевозок воздушным транспортом ввиду незначительности объемов, все же отметим, что непосредственно в 2019 году исследуемый показатель был равен 1,15 млн. тоннам, что, как свидетельствуют отчетные данные Росстата, выше индикатора за 2018 год на 1,1%.

На наш взгляд, для полноты видения данных процессов следует дополнить анализ оценкой динамики грузооборота в России за аналогичные периоды, рассматривая данный показатель в трлн. т-км, что отражено в таблице 2.

Таблица 2

Грузооборот по основным видам транспорта в России за 2010, 2015-2019 годы, в трлн. т-км [6]

Вид транспорта	Годы						Темп роста, в %		
	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2018/ 2015	2018/ 2017	2019/ 2018
Ж/д транспорт	2,011	2,306	2,344	2,493	2,596	2,601	112,6	104,1	100,2
Автотранспорт	0,199	0,247	0,248	0,255	0,260	0,274	105,1	101,8	105,4
Трубопроводный	2,382	2,444	2,489	2,615	2,670	2,686	109,2	102,1	100,6
Морской	0,100	0,042	0,043	0,046	0,045	0,036	107,5	98,2	80,0
Внутренний водный	0,054	0,064	0,067	0,067	0,068	0,062	105,8	101,1	91,2
Воздушный	0,005	0,006	0,007	0,008	0,006	0,007	100,8	71,4	116,7
Всего	4,752	5,108	5,198	5,484	5,644	5,669	110,5	102,9	100,4

Представленные данные свидетельствуют о росте грузооборота по всем видам транспорта, за исключением воздушного транспорта в 2018 году, когда наблюдалось снижение данного показателя с 0,008 трлн.-км в 2017 году до 0,006 трлн.-км в 2018 году (снижение на 28,6%).

Наблюдается постепенный рост анализируемого показателя в целом по России, начиная с 2015 по 2018 годы – увеличение на 10,5%.

Наибольший темп роста приходится на железнодорожный транспорт – 12,6%; рост грузооборота по трубопроводному транспорту составил 9,2%.

По морскому транспорту – рост грузооборота 7,5%, внутренний водный транспорт – 5,8%. Грузооборот воздушного транспорта - один из самых низких с точки зрения удельного веса к общему грузообороту в стране, но несмотря на это показатель грузооборота по данному виду транспорта также показал незначительный рост на 0,8%.

Для наглядности данный тренд отражен в виде графической иллюстрации на рисунке 1.

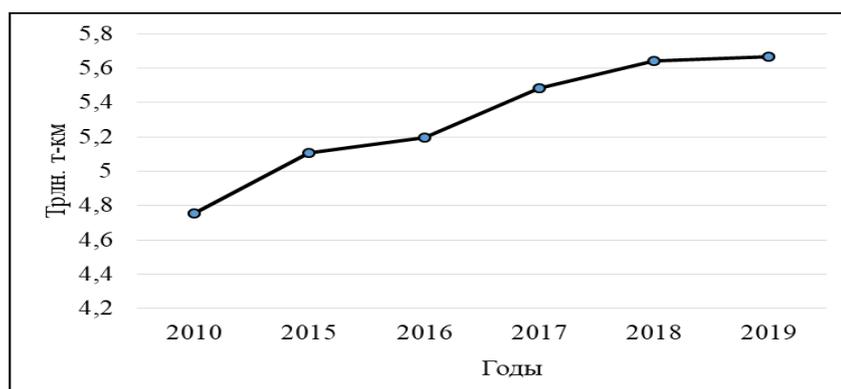


Рис. 1. Динамика грузооборота по основным видам транспорта в России за 2010, 2015-2019 годы, в трлн. т-км. [6]

Таким образом, представленная на рисунке 1 тенденция свидетельствует о наличии стабильного роста грузооборота по основным видам транспорта в России за 2010, 2015-2019 годы.

Далее, исходя из целей настоящего исследования, необходимо представить данные касательно динамики ВВП в России за аналогичные периоды, что позволит в итоге осуществить достоверную оценку транспортной эластичности в нашей стране.

В связи с изложенным, в таблице 3 отражена динамика (следует подчеркнуть, что анализ данных со второго квартала 2014 года представлен исходя, в том числе из статистики, учитывающей показатели по Крымскому Федеральному округу).

Таблица 3

Динамика ВВП Российской Федерации за 2010, 2015-2019 годы [6]

Показатель	Годы						Темп роста, в %		
	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2018/ 2015	2018/ 2017	2019 2018
ВВП, в текущих ценах, трлн. руб.	46,31	83,39	86,01	92,09	103,63	110,046	124,27	112,53	106,19

Таким образом, базируясь на представленных в таблице 3 данных, можно сделать заключение о значительном росте ВВП России в 2017 году по отношению к 2010 году, когда рост составил 98,86%, что на наш взгляд, связано с множеством факторов, среди которых и вхождение в состав страны Крыма, индикаторы которого также включены в данный анализ. Проведенный нами анализ показал, что ВВП в текущих ценах в 2019 году увеличился на 6,19% по отношению к 2018 году. Росту ВВП за исследуемый период также способствовал стабильный уровень цен на углеводородное сырье. Объем ВВП в 2018 году по отношению к 2017 году также вырос и составил 103,63 трлн. руб. (представленные данные отличаются от итогов за предыдущие годы на величину изменений, связанных с внедрением международной методологии, разработанной по методологии 6 издания «Руководства МВФ по платежному балансу и международной инвестиционной позиции – РПБ6») [7]. Обладая полноценной информацией касательно необходимых индикаторов для анализа транспортной эластичности нашей страны, далее представляется целесообразным и возможным осуществить оценку и проследить динамику

обозначенного показателя, отражающего, в том числе, возможность транзитных перевозок.

Расчеты показателя транспортной эластичности в России будут проведены в соответствии с формулой 1, а результаты расчетов отражены в соотношении 2015 год к 2010 году, и 2019 год к 2015 году. Исходные данные отражены в таблице 4.

Таблица 4

Исходные данные для расчета транспортной эластичности (глобальной) в России [6]

Показатели	2010 год	2015 год	2018 год	2019 год	Δ Показателя (2015-2010)	Δ Показателя (2019-2015)
Грузооборот транспорта в России, в трлн. т-км	4,752	5,108	5,644	5,669	0,356	0,561
ВВП, в текущих ценах, трлн. руб.	46,31	83,39	103,63	110,046	37,08	26,656

Приняв за основу расчетов исходные значения, представленные в таблице 4, далее возможен расчет транспортной эластичности (глобальной) по России за исследуемые периоды.

Расчет транспортной эластичности (глобальной) за 2010-2015 годы произведен ниже по формуле 3:

$$\mathcal{E}_{mp} = (0,356 / 37,08) \times (46,31 / 4,752) = 0,09 \quad (3)$$

Аналогичный расчет транспортной эластичности (глобальной) за 2015-2019 годы произведен по формуле 4:

$$\mathcal{E}_{mp} = (0,561 / 26,656) \times (83,39 / 5,108) = 0,343, \quad (4)$$

Проведенные расчеты свидетельствуют о том, что транспортная эластичность (глобальная) за исследуемые периоды меньше единицы, что показывает наличие более быстрых темпов роста ВВП страны, чем производительность транспорта (грузооборота). Однако более ярко данная тенденция выражена в период с 2010 по 2015 годы, тогда как транспортная эластичность (глобальная) по России за 2015-2019 годы, равная 0,343 (это значение ближе к 1) уже показывает замедление темпов роста ВВП и определенный рост грузооборота транспорта страны в целом. Таким образом, очевидно, что существует объективная необходимость и целесообразность выявления факторов, условий и векторов трансформации транспортной инфраструктуры, направленной на увеличение индикаторов эффективности транзитных перевозок в стране. [8].

Российский транспортный рынок и растущий спрос на качественные транзитные транспортные услуги представляет большой интерес для зарубежных поставщиков [9]. Однако сравнительный анализ показывает, что российская транспортная инфраструктура развита значительно хуже, чем европейская [10] и азиатская (китайская) [11]. Для получения более многогранной картины ситуации в транспортной отрасли нашей страны анализ дополнен показателями динамики объема перевозок грузов в международном сообщении по некоторым видам транспорта в таблице 5 (данные за 2018-2019 год на момент исследования не представлены в открытом доступе).

Таблица 5

Объемы перевозок грузов в международном сообщении по некоторым видам транспорта, за 2010, 2015-2017 годы, в млн. тонн.[6]

Перевозки по видам транспорта	Годы				Темп роста, в %		
	2010	2015	2016	2017	2017/ 2016	2017/ 2015	2017/ 2010
Экспорт морским транспортом	16,80	5,20	4,90	4,90	100,00	94,23	29,17
Импорт морским транспортом	2,00	0,30	0,20	0,30	150,00	100,00	15,00
Всего, перевозки морским транспортом	27,80	8,00	8,10	7,90	97,53	98,75	28,42
Экспорт внутренним водным транспортом	15,60	23,40	27,30	26,20	95,97	111,97	167,95
Импорт внутренним водным транспортом	0,70	1,20	1,00	0,70	70,00	58,33	100,00
Транзитные перевозки внутренним водным транспортом	0,20	0,40	0,30	0,10	33,33	25,00	50,00
Перевозки между иностранными портами	0,50	2,00	1,90	2,70	142,11	135,00	540,00
Всего, перевозки внутренним водным транспортом	17,00	27,10	30,50	29,70	97,38	109,59	174,71
Воздушным транспортом	0,70	0,60	0,70	0,90	128,57	150,00	128,57

Наблюдаются темпы роста перевозок грузов в международном сообщении воздушным транспортом на 28,57% (за 2010-2017 годы). Всего перевозки морским транспортом в международном сообщении снизились за данный период на 71,58%; транзитные перевозки внутренним водным транспортом снизились с 0,20 млн. тонн в 2010 году до 0,10 млн. тонн в 2017 году. Положительную динамику показал экспорт внутренним водным транспортом – увеличение на 67,95%. Всего перевозки внутренним водным транспортом увеличились с 17,00 млн. тонн до 29,70 млн. тонн в 2017 году.

Таким образом, представленные данные свидетельствуют о наличии роста транзитного потенциала нашей страны в условиях модернизации транспортной инфраструктуры.

Для дальнейшей оценки транзитной транспортной инфраструктуры страны в таблице 6 представлены аналитические данные о динамике развития протяженности основных путей сообщения России.

Таблица 6

Динамика развития протяженности основных путей сообщения в РФ за 2010, 2015-2018 годы, в тыс. км. [6]

Виды транспорта	Годы					Темп роста, в %		
	2010	2015	2016	2017	2018	2016/ 2015	2018/ 2016	2018/ 2010
Железнодорожные пути общего пользования	86,0	86,0	86,0	86,0	86,6	100,0	100,0	100,70
Автомобильные дороги – всего	1004,0	1642,0	1658,0	1666,0	1760,0	101,0	100,5	175,30
в том числе с твердым покрытием	786,0	1154,0	1162,0	1171,0	1230,0	100,7	100,8	156,49
Магистральные трубопроводы, в том числе:	233,0	252,0	250,0	250,0	250,0	99,2	100,0	107,30
газопроводы	167,0	178,0	179,0	180,0	180,0	100,6	100,6	107,78
нефтепроводы	49,0	55,0	54,0	53,4	53,4	98,2	98,9	108,98
Нефтепродуктопроводы	16,0	19,0	17,0	17,0	17,0	89,5	100,0	106,25
Внутренние водные судоходные пути	101,0	102,0	101,0	101,0	101,0	99,0	100,0	100,00
Всего	1424	2082	2095	2103	2197,6	100,62	104,90	154,33

Проведенный анализ динамики развития протяженности основных путей сообщения в нашей стране свидетельствует об увеличении протяженности основных транспортных магистралей в стране, в первую очередь, за счет увеличения протяженности автомобильных дорог с 2010 по 2018 год на 75,30% или на 756 тыс. км. Темпы роста протяженности транспортных путей в целом составили за данный период в среднем 154,33%.

Протяженность ж/д путей фактически не изменилась. Темпы роста протяженности путей с 2015 по 2018 годы намного медленнее, чем за 2010-2015 годы. Это свидетельствует о замедлении строительства и инвестиций в транспортную инфраструктуру страны начиная с 2015 года.

Дополняя данное исследование, автором осуществлен расчет плотности транспортной инфраструктуры (P_{mi}) России за 2015-2018 годы с учетом 2010 года. Расчет произведен посредством применения ранее обозначенной формулы (2) и в целях выявления обобщенного индикатора обеспеченности нашей страны (государства) транспортной сетью, рассчитан коэффициент Энгеля за исследуемые периоды по формуле 5:

$$K_3 = \frac{L_{mn}}{\sqrt{h * S}}, \quad (5)$$

где, h – общая численность населения исследуемой страны, тыс. чел.

Результаты расчета оформлены в табличной форме и отражены в таблице 7.

Таблица 7

Индикаторы плотности транспортной инфраструктуры в РФ за 2010, 2015-2018 годы. [6]

Показатели	Годы				
	2010	2015	2016	2017	2018
Протяженность путей сообщения, тыс. км	1424	2082	2095	2103	2197,6
Площадь государства, тыс. км ²	17098,24	17125, 19	17125, 19	17125, 19	17125, 19
Численность населения, тыс. чел	142856, 53	146267,28	146544,71	146804,37	146880,43
Плотность транспортной инфраструктуры, тыс. км/тыс.км ²	0,083	0,122	0,122	0,123	0,128
Коэффициент Энгеля	0,028	0,0416	0,0418	0,0419	0,0438

Из этого следует, что чем выше плотность транспортной инфраструктуры, тем больше транспортных путей, и тем лучше доступны отдельные территории в стране. Тем не менее, агрегированное рассмотрение этих показателей имеет ограниченную значимость, поскольку компенсационные эффекты не учитываются. Таким образом, по данным расчетов и в соответствии с значениями плотности, представленными в таблице 7, можно четко увидеть тенденцию медленного увеличения данного индикатора с 0,083 в 2010 году, до 0,122 в 2015 году и до 0,128 в 2018 году. Однако здесь прослеживается следующая особенность: плотность транспортной инфраструктуры с 2010 по 2015 год увеличилась на 0,039, тогда как с 2015 по 2018 год данное значение увеличилось только лишь на 0,006 и эта тенденция является одним из индикаторов неиспользуемого потенциала развития отечественной транспортной инфраструктуры. В свою очередь, низкая плотность дорожной сети в России является серьезной проблемой для транзитных перевозок. Аналогичная ситуация наблюдается по тенденции изменения значения коэффициента Энгеля, расчет которого позволил установить, что уровень транспортной инфраструктуры в 2010 году был довольно низкий и составлял 0,028, а в 2015 году значение составило 0,0416 (что на 0,0136 больше), в 2018 году данное значение по отношению к 2015 году увеличилось на 0,0022. Сложившаяся ситуация наглядно демонстрирует замедление развития уровня транспортной инфраструктуры страны с 2015 по 2018 годы, тогда как устойчивый экономический рост страны, улучшение качества жизни невозможны без сбалансированного всестороннего развития транспортного комплекса.

Пространственное распределение транспортной инфраструктуры увеличивает синергетическое воздействие многомерных факторов, влияющих на отечественный экономический рост. Транспортные средства, транспортная инфраструктура и экономические отношения имеют особое функциональное значение, которое непосредственно связано с такими основными понятиями, как территориальное деление и интеграция труда, экономическая регионализация, территориальная структура экономики, специализация и комплексное развитие экономических регионов. Иными словами, транспортно-экономические отношения – это неотъемлемая часть всей территориально-экономической системы.

Выводы

Острая проблема транспортной инфраструктуры региона и страны в целом – это состояние дорог и дорожных объектов. Дорожная сеть имеет тенденцию расти не за счет строительства современных автомобильных дорог, а за счет включения

дорожных фондов местных дорог для снижения нагрузки на магистрали общего пользования. Очевидно, что чем лучше состояние транспортной инфраструктуры, тем выше доходность других отраслей производства, включая труд и капитал. Подводя итог проведенному анализу, представляется возможным отметить, что эффективность транспортных систем и транспортной инфраструктуры страны является одним из основных факторов развития ее транзитного потенциала. Не вызывает сомнения тот факт, что в области исследования тенденций развития транспортной инфраструктуры страны основным направлением является разработка согласованных и соответствующих международным стандартам нормативно-правовых, экономически обоснованных механизмов государственного управления и модернизации транспортной инфраструктуры, оборудования и транспортных потоков по четырем основным видам транспорта: железнодорожному, автомобильному, водному и воздушному.

Таким образом, эффективная транспортная система и транспортная инфраструктура являются одной из важных предпосылок для экономического и социального развития. Эффективная транспортная система означает функционирование в рамках международных норм с применением современных транспортных технологий, минимальных таможенных формальностей, эффективного законодательства и фискальной политики, а также прозрачной информационной среды. С другой стороны, эффективное функционирование экономики предполагает не быстрое развитие транспорта как отдельного сектора экономики, а минимизацию транспортных расходов на каждом уровне. Это означает ликвидацию барьеров при перемещении транзитных грузов (товаров) по территории нашего государства и привлечение новых потенциальных потребителей транзитной транспортной инфраструктуры.

Литература

1. АНК (Deutsch-Russische Auslandshandelskammer), ОА (Ost-Ausschuss der Deutschen Wirtschaft) (Hrsg.), Geschäftsklima Russland 2017, Moskau/Berlin 2017. С. 5.
2. Connecting to Compete 2018 Trade Logistics in the Global Economy. The Logistics Performance Index and Its Indicators // The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank.[Электронный источник], режим доступа: URL: <http://documents.worldbank.org/curated/en/576061531492034646/pdf/128355-WP-P164390-PUBLIC-LPIfullreportwithcover.pdf> (дата обращения: 25.03.2020).
3. Контейнерный транзит: реальность и потенциал // [Электронный ресурс], режим доступа: URL: <https://www.fesco.ru/blog/34203/>
4. Stock, W., Bernecker, T., Verkehrsökonomie, 2. Aufl., Wiesbaden 2014. С.6.
5. Pfohl, H.-C., Logistiksysteme, 8. Aufl., Berlin/Heidelberg 2010. С. 318.
6. Транспорт в России. 2018: Стат.сб./Росстат. - Т65 М., 2018. - С.33-35.
7. Динамика и структура ВВП России. Бюллетень о текущих тенденциях Российской экономики. Выпуск №48, апрель 2019 // Аналитический центр при правительстве Российской Федерации [Электронный ресурс], режим доступа: <https://ac.gov.ru/files/publication/a/21979.pdf>
8. Cargo Operator. Информационная платформа для профессионалов // [Электронный ресурс], режим доступа: URL: <https://cargo-report.info/stat/transit-country/>
9. Doing business and investing in the Russian Federation – PwC [Электронный ресурс], режим доступа: <https://www.pwc.ru/ru/business-membership/doing-business-and-investing-in-russia.pdf>
10. ACEA Position Paper: European Transport Policy after 2020–November 2019 [Электронный ресурс], режим доступа: https://www.acea.be/uploads/publications/ACEA_Position_PaperEuropean_Transport_Policy_after_2020.pdf
11. Mouhamed Bayane Bouraima, Yanjun Qiu Transport infrastructure development in China// May 2017 Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics 2(1):29-39

References

1. АНК (Deutsch-Russische Auslandshandelskammer), ОА (Ost-Ausschuss der Deutschen Wirtschaft) (Hrsg.), Geschäftsklima Russland 2017, Moskau/Berlin 2017: 5.
2. Connecting to Compete 2018 Trade Logistics in the Global Economy. The Logistics Performance Index and Its Indicators // The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. [Electronic resource], access mode: URL: <http://documents.worldbank.org/curated/en/576061531492034646/pdf/128355-WP-P164390-PUBLIC-LPIfullreportwithcover.pdf> (access date: 25.03.2020).
3. Container Transit: Reality and Potential // [Electronic resource], access mode: URL: <https://www.fesco.ru/blog/34203/>
4. Stock, W., Bernecker, T., Verkehrsökonomie, 2. Aufl., Wiesbaden 2014: 6.
5. Pfohl, H.-C., Logistiksysteme, 8. Aufl., Berlin/Heidelberg 2010: 318.
6. Transport in Russia. 2018: Statistical Yearbook/Rosstat. – Vol. 65, M., 2018: 33-35.
7. Dynamics and Structure of Russian GDP. Report on Current Trends of Russian Economy. Issue №48, April 2019 // Analytical Center for the Government of the Russian Federation [Electronic resource], access mode: <https://ac.gov.ru/files/publication/a/21979.pdf>
8. Cargo Operator. Information Platform for Professionals // [Electronic resource], access mode: URL: <https://cargo-report.info/stat/transit-country/>
9. Doing Business and Investing in the Russian Federation – PwC [Electronic resource], access mode: <https://www.pwc.ru/ru/business-membership/doing-business-and-investing-in-russia.pdf>
10. ACEA Position Paper: European Transport Policy after 2020–November 2019 [Electronic resource], access mode: https://www.acea.be/uploads/publications/ACEA_Position_PaperEuropean_Transport_Policy_after_2020.pdf
11. Mouhamed Bayane Bouraima, Yanjun Qiu Transport infrastructure development in China// May 2017 Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics 2(1): 29-39.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Троиллина Анна Владимировна, старший преподаватель кафедры мировой экономики, Ростовский государственный экономический университет (РИНХ) (ФГБОУ ВО «РГЭУ (РИНХ)»), 344002, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 69, e-mail: annatroilina@gmail.com

Anna V. Troilina, senior lecturer of the Department of World Economy, Rostov State University of Economics, 69, Bolshaya Sadovaya str., Rostov-on-Don, 344002

Статья поступила в редакцию 08.12.2021; опубликована онлайн 23.03.2021.

Received 08.12.2021; published online 23.03.2021.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ И БЕЗОПАСНОСТЬ СУДОХОДСТВА

УДК 656.62.052.4:[629/12:532.5]

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi66.149>

Анализ методик определения значения критической скорости судна при заходе в камеру шлюза предельно малой ширины

Е.В. Зубкова¹

<https://orcid.org/0000-0001-7212-0165>

А.Н. Клементьев¹

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

Аннотация. Целью работы является оценка точности определения значения критической скорости судна при заходе в камеру шлюза. Приведен анализ аналитических зависимостей по определению значения критической скорости судна при заходе в камеру шлюза, полученных различными авторами ранее в ходе проведения модельных и натурных испытаний. Отмечены основные факторы, влияющие на безопасность процесса захода. Установлено, что величины критической скорости, рассчитанные по различным методикам, дают разброс значений. При этом некоторые из них не позволяют определять значение критической скорости при заходе крупногабаритного судна в шлюз при больших значениях коэффициента стеснения. Указано, что безопасная и эффективная скорость захода в шлюз зависит от скорости потока, обтекающего корпус судна, которая, в свою очередь, определяется высотой поперечной волны перед форштевнем судна (т. е. уклоном свободной поверхности воды). Указанные факторы приводят к выводу о необходимости дальнейшего исследования.

Ключевые слова: судно, шлюз, заход судна в камеру шлюза, критическая скорость.

Analysis of methods determining the value of the vessel's critical speed when entering the lock chamber minimum width

Alexander N. Klementev¹

Evgenia V., Zubkova¹

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

Abstract. The paper presents an review of analytical dependencies to determine the value of the vessel critical speed when entering the lock chamber. We present the review of analytical dependences for determining the vessel critical speed value when entering the lock chamber, obtained by various authors earlier in the course of model and full-scale tests. The main factors affecting the safety of the approach process are noted. It was established that the critical speed values calculated by various methods give a spread of values. However, some of them do not allow determining the the critical speed value when the vessel enters the lock at high values of the constraint coefficient. It is indicated that the safe and effective speed of entry into the lock depends on the speed of the stream flowing around the vessel hull, which, in turn, is determined by the height of the shear wave in front of the ship's bow (i.e., the

slope of the free surface of the water). These factors lead to the conclusion that further research is necessary.

Keywords: ship, lock, ship entry into the lock chamber, critical speed

Введение

В настоящее время практически исчерпаны все резервы для сокращения времени технических операций шлюзования судов. Поэтому единственный резерв для сокращения времени пропуска судов через шлюзы видится в оптимизации времени процесса входа (выхода) судов в камеру шлюза.

Практические наблюдения показывают, что при заходе в камеру шлюза при минимальных запасах воды под днищем для каждого судна существует определенная допустимая скорость, превышать которую не следует. Эта скорость по условию гидравлических явлений (резкому увеличению скоростей обтекающего корпус судна потока, интенсивному волнообразованию) близка к критическому значению.

Превышение таких скоростей зачастую приводит к возникновению «поршневого эффекта», когда скорость судна резко падает вплоть до остановки и даже возникает смещение судна в обратном направлении. Движение судна вновь восстанавливается, когда разность давления воды в камере шлюза и за ее пределами уменьшится за счет перетекания воды под днищем судна и вдоль бортов. Это влияет на время шлюзования. Подобные явления наблюдаются зачастую в шлюзах предельно малой ширины с коэффициентом стеснения 0,7- 0,8.

Такой эффект можно объяснить тем, что если при движении судна в судоходном канале с постоянным сечением мощности двигателей не хватает для достижения критических значений скорости, то при заходе в камеру шлюза предельно малой ширины крупнотоннажное судно может достигнуть и даже превысить значение первой критической скорости. В этом случае к силе упора движителей прибавляется сила инерции судна, а само значение первой критической скорости на коротком участке движения падает в несколько раз по сравнению с ее значением в подходном канале вследствие резкого увеличения степени стеснения живого сечения и увеличением скоростей обтекания корпуса судна встречным потоком.

Исследовательская часть

Из теории гидравлики [1] известно, что критическая скорость потока определяется для прямоугольных сечений по выражению:

$$V_{кр} = \sqrt{\frac{g(\Omega_k - \Omega_c)}{B_c}}, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения;

Ω_k – площадь водного сечения камеры шлюза;

Ω_c – площадь погруженной части мидельшпангоута судна;

B_c – ширина судна.

Несложные расчеты показывают, что для т/х «Волго-Дон» при заходе в камеры шлюзов Волго-Донского и Волго-Балтийского каналов при статическом запасе воды под днищем судна от 0,4 до 0,9 м значения критической скорости, рассчитанной по формуле (1), находится в пределах 2,6-3,4 м/с.

Хельм в работе [2] предлагает определять значение критической скорости по формуле:

$$V_{кр} = \sqrt{g \frac{\Omega_k - \Omega_c}{\omega_k + \omega_c}}, \quad (2)$$

где $\omega_k + \omega_c$ – суммарный смоченный периметр камеры шлюза и судна.

Расчеты по формуле (2) для тех же условий дают значения критической скорости 1,6-2,1 м/с.

Анализ натурных и модельных исследований ввода и вывода судна в шлюзах [3-10] позволил авторам сделать вывод, что моделирование по Фруду допустимо и в условиях большого стеснения (0,5-0,8), несмотря на малые скорости движения судна.

Установлено, что для каждого коэффициента стеснения существует своя рациональная скорость движения, которая не должна превышать $0,95V_{кр}$, что позволяет оптимизировать время маневра. Также следует учитывать влияние судоходного сооружения и судна на скорость распространения волны.

При этом скорость распространения судовой волны и скорость судна связаны соотношением:

$$V_c = k\sqrt{gR_r}, \quad (3)$$

где k – коэффициент, учитывающий влияние судоходного сооружения и судна на скорость распространения волны.

R_r – гидравлический радиус.

$$R_r = \frac{\Omega_k - \Omega_c}{\omega_k + \omega_c}$$

При тех же запасах воды под днищем величины гидравлического радиуса достигают значений 0,26-0,43.

В настоящее время известно много других работ с методиками расчета определения значения критических скоростей при движении судов в судоходных каналах и шлюзах.

Наиболее известной является зависимость, предложенная Г. И. Сухомелом [11]:

$$V_{кр} = \sqrt{8 \cos^3 \frac{1}{3} (\pi + \arccos k) \cdot \sqrt{gH_0}}, \quad (4)$$

$$k = 1 - \frac{\Omega_c}{\Omega_k},$$

Где

H_0 – начальная глубина в камере шлюза.

С.С. Кирьяков в работе [12] предлагает значение критической скорости определять по выражению

$$V_{кр} = \sqrt{8 \cos^3 \frac{1}{3} \left(\pi + \arccos \frac{k}{M} \right) \cdot \sqrt{gMH_0}} \quad (5)$$

Данная зависимость дополнительно учитывает влияние и средневзвешенного коэффициента трения $M = (1/k)^{0,5}$.

На рис.1 приведены графические зависимости, рассчитанные по формулам (4,5) для определения значений критической скорости в виде функции $V_{кр} = f(k, H_0)$.

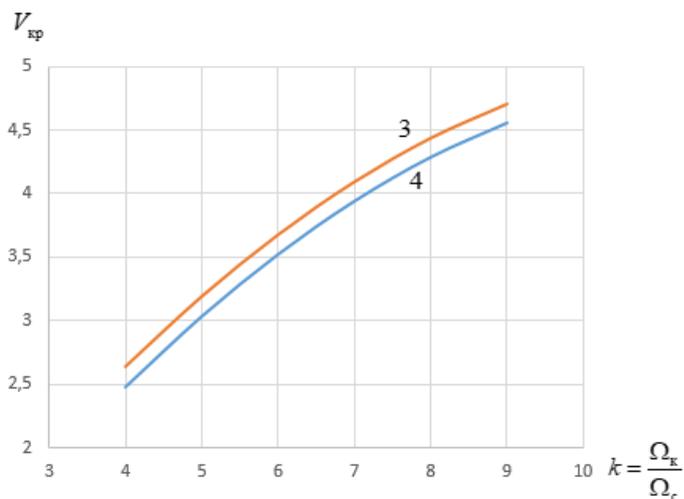


Рис.1. Графические зависимости для определения критической скорости при заходе в камеру шлюза

Приведенные графические зависимости дают удовлетворительную сходимость с результатами экспериментальных испытаний. Однако, следует отметить, что при значениях коэффициента стеснения менее 3 значения критической скорости по приведенным графическим зависимостям, не определяются.

В работе [13] значение критической скорости определяется по зависимости:

$$V_{кр} = \sqrt{6 \cos \frac{\pi + \varphi}{3} - 2(1-k)} \cdot \sqrt{g \frac{\Omega_k}{B}}, \quad (6)$$

где $\varphi = \arccos(1-k)$; $k = \frac{\Omega_c}{\Omega_k}$.

Для упрощения расчетов критическую скорость предлагается определить с помощью графика на рис.2, найдя по пунктирной кривой при известном коэффициенте стеснения k число Фруда Fr_1 и, затем $V_{кр1}$.

$$V_{кр1} = Fr_1 \sqrt{g \frac{\Omega_k}{B}}.$$

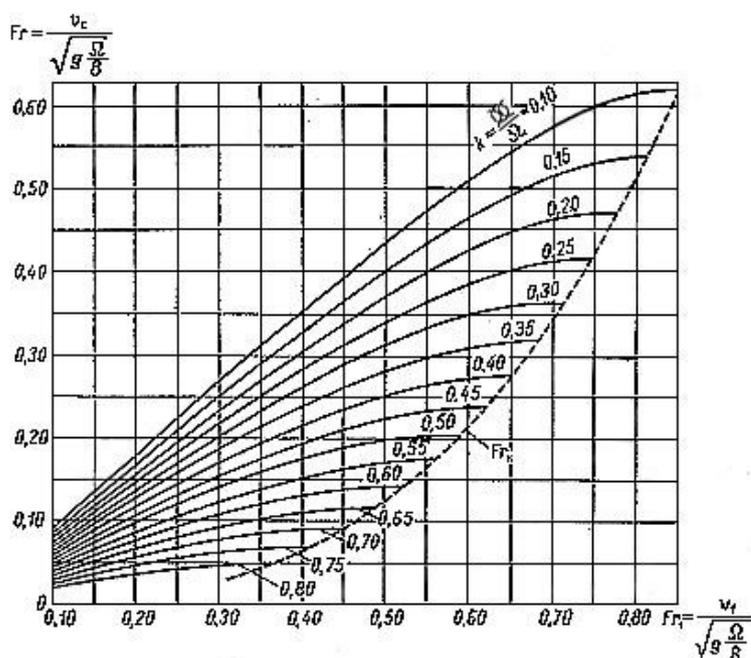


Рис.2. График для определения критической скорости движения

Однако, как видно из рис.2, при значении коэффициента стеснения k больше 0,8, величина критической скорости не определяется.

В работе [14] авторами предложена методика определения значений критической скорости при заходе судна в шлюз с использованием вспомогательных графиков (рис.3,4), которые позволяют упростить и ускорить расчеты, в следующем виде.

В качестве предельной величины скорости захода судна в камеру шлюза рекомендовано принимать скорость равную $V_{\text{зах}} < 0,9V_{\text{кр1}}$, при превышении которой резко возрастают сопутствующие гидравлические явления, вызывающие падение скорости и увеличение динамической пресадки судна.

Значение критической скорости предлагается определять по зависимости:

$$V_{\text{кр1}} = Fr_k \sqrt{2gH_{\text{п}}}, \quad (7)$$

где $H_{\text{п}}$ – глубина на пороге шлюза;

k – коэффициент стесненности.

Для определения $V_{\text{кр1}}$ можно воспользоваться вспомогательным графиком 3. Для ускорения практических расчетов - графиком 4.

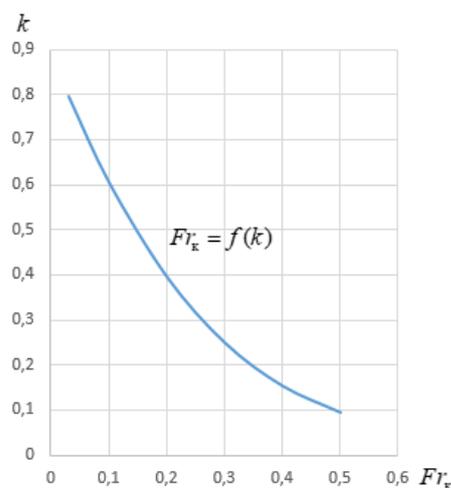


Рис.3. График зависимости величины Fr_k от коэффициента стесненности k

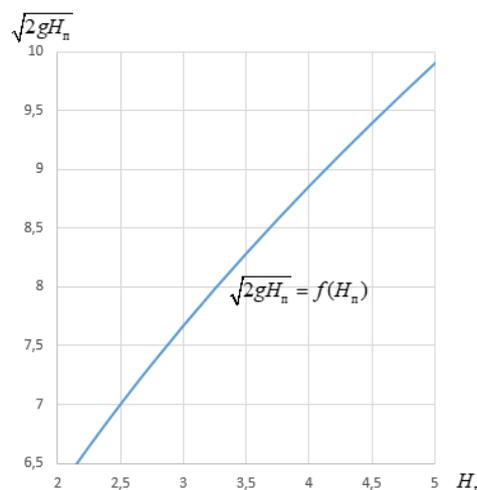


Рис. 4. Зависимость $\sqrt{2gH_n}$ от H_n

Результаты расчетов

Значения критической скорости, рассчитанной по формулам (1-7) для случая предельного стеснения в камере шлюза ($k=0,7-0,82$) для т/х «Волго-Дон» приведены в табл.1

Таблица 1

Значения критической скорости при заходе в шлюз

$k = \frac{\Omega_c}{\Omega_k}$	Формула					
	1	2	4	5	6	7
0,82	2,60	1,60	0,26	0,28	0,51	0,26
0,77	2,95	1,80	0,38	0,40	0,62	0,44
0,70	3,40	2,10	0,57	0,60	0,73	0,61

Заключение

Анализ результатов расчетов, приведенных в табл.1, показывает, что они имеют расхождение в значениях критической скорости.

Очевидно, что только знание критической скорости не определяет безопасность выполнения маневра захода судна в камеру шлюза.

Характер движения судна определяется соотношением между скоростью судна и скоростью обтекающего его потока, вызванного уклоном свободной поверхности воды и увеличением сопротивления воды движению.

Именно по этой причине автором работы [15] предложено определять значение критической скорости с учетом скорости потока, обтекающего корпус судна в зависимости от уклона поверхности воды по формуле:

$$V_{кр} = \sqrt{gH_0} - V_{обт} , \tag{8}$$

где $V_{обт}$ – скорость обтекающего потока.

В связи с вышеизложенным, для выработки практических рекомендаций судоводителям необходимо продолжить исследования по выбору безопасной и

эффективной скорости захода в камеру шлюза с учетом влияния отмеченных факторов.

Литература

1. Басин, А.М. Гидродинамика судов на мелководье / А.М. Басин и [др.]. – Ленинград: Судостроение, 1976 – 319 с. – Текст : непосредственный.
2. Helm K. Einfluss der verschiedenen Flachwasserprofile auf Wieldstand und Vortrieb von Binnenschiffen mit Rechnungsbeispiele für die Bindwasserstrasse der Klasse IV «Hansa» Zentralorgan für Schifffahrt. Schiffhafen. Hamburg. Nr. 11. 1965.
3. Похабов, В.И. Анализ результатов экспериментальных исследований движения судов в судоходных сооружениях / В.И. Похабов, Е.И. Адерихина, Ю.В. Бочаров. – Текст : непосредственный // ЦБНИИ ДРТ «Наука и техника на речном транспорте». – 1996. – №9. – С.1-9.
4. Кирьяков, С.С. Анализ результатов исследования ввода и вывода судов в шлюзах / С.С. Кирьяков, В.И. Похабов, Е.И. Адерихина. – Текст : непосредственный // ЦБНИИ ДРТ «Наука и техника на речном транспорте». – 1996. – №4. – С.12-18.
5. Кирьяков, С.С. Анализ натурных исследований ввода и вывода судов в шлюзах / С.С. Кирьяков, В.И. Похабов, Е.И. Адерихина, Ю.В. Бочаров – Текст : непосредственный // ЦБНИИ ДРТ «Наука и техника на речном транспорте». – 1996. – №10. – С.11-20.
6. Результаты лабораторных исследований движения судна в сверхограниченных фарватерах / В.И. Похабов. – Текст : непосредственный // Сборник научных трудов МИИВТа. Серия: «Повышение надежности механического оборудования судоходных гидротехнических сооружений». – 1996. – №10. – С.139-159.
7. Экспериментальные лабораторные исследования ввода и вывода судов в камерах судопропускных сооружений / С.С. Кирьяков, В.И. Похабов, С.Ю. Третьяк. – Текст : непосредственный // Сборник научных трудов МИИВТа. Серия: «Эксплуатация водных путей и гидротехнических сооружений». – 1992. – №11. – С.42-69.
8. Tothill I. T. Ships in restricted channels. A correlation of more tests, field measurements and theory, Ottawa, 1966.
9. Schale E. Stromungsmessungen in einem Stillwassercanal trap formigen Querschnitts. «Schiff und Hafen». N 5, 1968, 20
10. Windsor I. Hydraulic assistance on the Welland ship. Waterways and Harbors Div. Proc. Civil Engrs. No.1, 1968, p. 94
11. Сухомел, Г.И. Исследование движения судов по ограниченным фарватерам / Г.И. Сухомел, В.М. Засс, Л.И. Янковский. – Киев, АН УССР, 1956. – 163 с. – Текст : непосредственный.
12. Кирьяков С.С. Исследование дополнительных осадок и скоростей при входе и выходе судов в шлюзах. // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. ЛИИВТ, – 1971. – 245 с. – Текст : непосредственный.
13. Временные строительные нормы. Указания по проектированию судоходных каналов. Приказ Минречфлота РСФСР ВСН 3-70. [Утверждены 01.01.1972г.]. – Текст : непосредственный.
14. Клементьев, А.Н. Рекомендации по маневрированию судов в зоне судоходных гидротехнических сооружений Волжского бассейна. / А.Н. Клементьев, П.Н. Токарев. – Горький, 1992. – 78 с. – Текст : непосредственный.
15. Fuehrer M. Der Einfluss der örtlichen Stromungsverhältnisse Umgegend von Schiffen auf die Wechselbeziehungen zwischen Schiffen Kanal. «Schriftenzelle Wasserund Grundbau». H., 11 Berlin. 1964.

References

1. Basin, A.M. Hidrodinamika sudov na melkovod'e / A.M. Basin i [dr.]. – Leningrad: Sudostroenie, 1976 – 319 s. – Tekst : neposredstvennyj.
2. Helm K. Einfluss der verschiedenen Flachwasser profile auf Wieldstand und Vortrieb von Binnenschiffen mit Rechnungsbeispiele für die Bindwasserstrasse der Klasse IV «Hansa» Zentralorgan für Schifffahrt. Schiffhafen. Hamburg. Nr. II. 1965.

3. Pohabov, V.I. Analiz rezul'tatov eksperimental'nyh issledovanij dvizheniya sudov v sudohodnyh sooruzheniyah / V.I. Pohabov, E.I. Aderihina, YU.V. Bocharov. – Tekst : neposredstvennyj // CBNII DRT «Nauka i tekhnika na rechnom transporte». –1996. – №9. – S.1-9.
4. Kir'yakov, S.S. Analiz rezul'tatov issledovaniya vvoda i vyvoda sudov v shlyuzah / S.S. Kir'yakov, V.I. Pohabov, E.I. Aderihina. – Tekst : neposredstvennyj // CBNII DRT «Nauka i tekhnika na rechnom transporte». –1996. – №4. –S.12-18.
5. Kir'yakov, S.S. Analiz naturnykh issledovanij vvoda i vyvoda sudov v shlyuzah / S.S. Kir'yakov, V.I. Pohabov, E.I. Aderihina, YU.V. Bocharov – Tekst : neposredstvennyj // CBNII DRT «Nauka i tekhnika na rechnom transporte». –1996. – №10. –S.11-20.
6. Rezul'taty laboratornykh issledovanij dvizheniya sudna v sverhgranichennykh farvaterah / V.I. Pohabov. – Tekst : neposredstvennyj //Sbornik nauchnykh trudov MIVTa. Seriya: «Povyshenie nadezhnosti mekhanicheskogo oborudovaniya sudohodnykh gidrotekhnicheskikh sooruzhenij». – 1996. – №10. –S.139-159.
7. Eksperimental'nye laboratornye issledovaniya vvoda i vyvoda sudov v kamerah sudopropusknykh sooruzhenij / S.S. Kir'yakov, V.I. Pohabov, S.YU. Tretyak. – Tekst : neposredstvennyj //Sbornik nauchnykh trudov MIVTa. Seriya: «Ekspluatatsiya vodnykh putej i gidrotekhnicheskikh sooruzhenij». –1992. – №11. –S.42-69.
8. Tohill I. T. Ships in restricted channels. A correlation of more tests, field measurements and theory, Ottawa, 1966.
9. Schale E. Stromungsmessungen in einem Stillwassercanal trap formigen Querschnitts. «Schiff und Hafen». H 5, 1968, 20
10. Windsor I. Hydraulic assistance on the Welland schip. Waterways and Harbors Div. Proc. Civil Engrs. No.1, 1968, p. 94
11. Suhomel, G.I. Issledovanie dvizheniya sudov po ogranichennym farvateram / G.I. Suhomel, V.M. Zass, L.I. Yankovskij. – Kiev, AN USSR, 1956. – 163 s. – Tekst : neposredstvennyj.
12. Kir'yakov S.S. Issledovanie dopolnitel'nykh osadok i skorostej pri vhode i vyhode sudov v shlyuzah. //Dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. LIVT, – 1971. – 245 s. – Tekst : neposredstvennyj.
13. Vremennye stroitel'nye normy. Ukazaniya po proektirovaniyu sudohodnykh kanalov. PrikazMinrechflota RSFSR VSN 3-70. [Utverzheny 01.01.1972g.]. – Tekst : neposredstvennyj.
14. Klement'ev, A.N. Rekomendacii po manevrirovaniyu sudov v zone sudohodnykh gidrotekhnicheskikh sooruzhenij Volzhskogobassejna. / A.N. Klement'ev, P.N. Tokarev. – Gor'kij, 1992. – 78 s. – Tekst : neposredstvennyj.
15. Fuehrer M. Der Einfluss der ortlichen Stromungsverhältnisse Umgedung von Schiffen auf die Wechselbeziehungen zwischen Schiffen und Kanal. «Schriftenreihe Wasser und Grundbau». H., Berlin. 1964.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Зубкова Евгения Владимировна, аспирант кафедры судождения и безопасности судоходства, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kaf_sbs@vsuwt.ru

Клементьев Александр Николаевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры судождения и безопасности судоходства, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kaf_sbs@vsuwt.ru

Evgenia V., Zubkova, Graduate student of the Department of navigation and safety shipping, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Alexander N. Klementev, Tech Scs. Dr., Professor of the Department of navigation and safety shipping, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 25.12.2021; опубликована онлайн 23.03.2021.

Received 25.12.2021; published online 23.03.2021.

УДК 627.15

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi66.153>

Математическая модель и алгоритмизация процесса решения задачи внутрисуточного регулирования сброса воды через Нижегородский низконапорный гидроузел

А.Н. Ситнов¹

С.О. Агеев²

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

²*Администрация Волжского бассейна внутренних водных путей, г. Нижний Новгород, Россия.*

Аннотация. Введение мероприятий по внутрисуточному регулированию стока поступающих с Нижегородской ГЭС расходов и их сброса через водослив Нижегородского низконапорного гидроузла требует конкретного алгоритма действий диспетчеров создаваемого гидроузла. При этом возникают серьезные трудности при прогнозировании водного режима во времени: как показали предыдущие исследования, имеется большая неравномерность и нерегулярность сбросов воды не только в течение одних суток, но и в одни и те же периоды каждых суток, а также недели, месяца, года. В работе проведен анализ граничных условий при введении мероприятий по регулированию стока, разработаны математическая модель и алгоритм решения задачи внутрисуточного регулирования, описывающий последовательность действий для решения задачи «сглаживания» подаваемых расходов в нижний бьеф Нижегородского низконапорного гидроузла. Реализация предложенных мероприятий осуществляется по трехступенчатому (или двухступенчатому) графику регулирования расхода и уровня воды. Предлагаемые мероприятия позволят улучшить гидравлические и гидрологические условия нижнего бьефа Нижегородского низконапорного гидроузла, при которых за счет более равномерного и щадящего режима попусков воды будут достигнуты необходимые глубины для судоходства, а также созданы условия для смягчения эрозионных процессов на нижележащем участке.

Ключевые слова: Нижегородский низконапорный гидроузел, нижний бьеф, неравномерность сбросов воды, расходы воды, суточный гидрограф, транспортный попуск, математическая модель, граничные условия, алгоритм регулирования стока, колебание уровня воды, кривые свободной поверхности воды, переформирование русла.

Mathematical model and algorithmic process of solving the problem of the intra-day regulation of discharge of water through the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric complex

Alexander N. Sitnov¹

Sergey O. Ageev²

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

²*The Administration of The Volga Pool of Internal Waterways, Nizhny Novgorod, Russia*

Abstract. Introduction of measures for intra-day of regulating incoming water flow rates from the Nizhny Novgorod HPP and their discharge through the spillway of the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric complex requires a specific algorithm for dispatcher

actions of the created hydraulic system. At the same time, there are serious difficulties in predicting the water regime in time. As previous studies have shown there is a large unevenness and irregularity of water discharges not only during one day, but also in the same periods of every day, as well as week, month, and year. This article analyzes the boundary conditions when introducing measures of regulating runoff, develops a mathematical model and an algorithm for solving the problem of intraday regulation, describing the sequence of actions for solving the problem of "smoothing" the flow rates supplied to the lower stream of the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric complex. The implementation of the proposed measures is carried out according to a three-stage (or two-stage) schedule for regulating the flow rate and water level. The proposed measures will improve the hydraulic and hydrological conditions of the downstream reach of the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric complex by which the necessary depths for navigation will be created. Conditions have also been made to mitigate erosion processes

Keywords: Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric complex, the downstream reach, water discharges irregularity, water flow rates, the daily hydrograph, transport release, mathematical model, boundary conditions, discharge control algorithm, water level fluctuation, free water surface curves, channel reshaping.

Введение

Проведенные исследования, отраженные в работах [1, 2, 3], показали высокую неравномерность сбрасываемых расходов с Нижегородской ГЭС (ННГЭС). Режим прохождения расходов воды через створ низконапорного гидроузла будет в основном соответствовать режиму сбросов с ННГЭС, не улучшая условий судоходства в нижнем бьефе по сравнению с существующим состоянием и может повлечь интенсивное переформирование дна реки ниже створа Нижегородского низконапорного гидроузла (ННГУ).

Данную неравномерность предлагается сгладить введением внутрисуточного регулирования поступающих с ННГЭС расходов при их сбросе через створ ННГУ, тем самым улучшить судоходное состояние участка реки, расположенного в нижнем бьефе ННГУ (от ННГУ до р.п. Работки (место выклинивания подпора Чебоксарского водохранилища при отметке 63,0 м БС). В работах [4, 5, 6] обоснована необходимость, возможность и целесообразность регулирования стока на водосливе ННГУ путем подачи в нижний бьеф (НБ) ННГУ более равномерного расхода воды в течение суток.

Методические особенности регулирования стока через ННГУ

Решение задачи сведено к трансформации суточного гидрографа ННГЭС в суточный гидрограф ННГУ с учетом наложенных ограничений [7], целью которых является минимизация отклонений интервальных расходов воды через ННГУ Q_i от среднесуточного расхода $Q_{сут}$:

$$Q_i^{ННГУ} X_{Qi} - \bar{Q}_{сут}^{ННГЭС} \rightarrow \min, \forall i, \quad (1)$$

где i – период регулирования, $i = \overline{1, n}$;

$Q_i^{ННГУ}$ – расход воды через створ ННГУ в i – ом периоде, м³/с;

X_{Qi} – переменная, показывающая возможность подачи расхода Q через ННГУ в i – ом периоде;

$\bar{Q}_{сут}^{ННГЭС}$ – среднесуточный расход через створ ННГЭС в плановые сутки, м³/с.

Расходы i – ого периода регулирования стока лежат в области изменения расходов ННГУ i – ого периода от минимальных $Q_{imin}^{ННГЭС}$ до максимальных $Q_{imax}^{ННГЭС}$.

$$(Q_i^{ННГУ} \in Q_{imin}^{ННГЭС} \div Q_{imax}^{ННГЭС})$$

Математическая модель решения задачи внутрисуточного регулирования сброса воды через ННГУ имеет следующие граничные условия (ГУ)

Граничное условие 1 (ГУ.1). Соблюдение условия транзитности: объем суточного стока, проходящего через Городецкий гидроузел с его корректировкой на потребление и приток воды на водохранилище, должен соответствовать объему стока, сбрасываемого через ННГУ.

$$\sum_{i=1}^n Q_i^{\text{ННГУ}} t_i X_{Qi} = V_{\text{сут}}^{\text{ННГЭС}} \pm \Delta V_{\text{сут}}, \quad (2)$$

где t_i – продолжительность i -х периодов в плановых сутках;

$V_{\text{сут}}^{\text{ННГЭС}}$ – суточный объем сброса воды с ННГЭС;

$\Delta V_{\text{сут}}$ – суточный объем стока, зависящий от приточности водохранилища, потребления воды на осуществление шлюзования и т.д.

Граничное условие 2 (ГУ.2). Расход воды, сбрасываемый в нижний бьеф ННГУ, не должен быть ниже транспортного попуска $Q_{\text{ТП}}$, принятого равным $1140 \text{ м}^3/\text{с}$ [8]. Этим планируется обеспечить глубины в нижнем бьефе ННГУ не ниже гарантируемых без дополнительного комплекса путевых работ.

$$Q_i^{\text{ННГУ}} X_{Qi} \geq Q_{\text{ТП}}, \forall i, \quad (3)$$

Для выполнения ограничения ГУ.2 требуются дополнительные объемы воды, которых в плановых сутках нет, поскольку накопление воды для обеспечения транспортного попуска происходит в период, следующий за «провальным» (ночные и утренние часы). В этой связи объем должен накапливаться раньше и переходить с предыдущих суток на плановые и с плановых на последующие. Накопление данных объемов будет связано с незначительным повышением уровня воды на водохранилище, образованном ННГУ.

Граничное условие 3 (ГУ.3). Уровни воды на водохранилище в створе ННГУ должны находиться в диапазоне значений от минимальных ($68,0 \text{ м БС}$) до максимально возможных ($Z_{\text{пр}}$) по условиям ветро-волнового режима, конструктивных параметров затворов ННГУ и др. характеристикам. По проектным решениям с учетом возможного нагона ветровой волны в створе ННГУ повышение уровня воды равно $0,6 \text{ м}$ [9] при отметке верха затвора $69,0 \text{ м БС}$ [10]. В работе расчеты выполнялись до отметки $68,5 \text{ мБС}$.

$$Z_i^{\text{ННГУ}} X_{Qi} \leq Z_{\text{пр}}, \forall i, Z_i^{\text{ННГУ}} \in 68,0 \div Z_{\text{пр}} \quad (4)$$

где $Z_i^{\text{ННГУ}}(x)$ – отметка воды в створе верхнего бьефа ННГУ, соответствующая накопленному объему воды с учетом рассчитанных кривых свободной поверхности воды и подаваемых расходов с ННГЭС. Определяется назначенными расходами $Q_i^{\text{ННГУ}}$, сбрасываемыми в i -х периодах через водослив ННГУ.

$Z_{\text{пр}}$ – предельное значение уровня воды.

Переменная X_{Qi} равна:

$$X_{Qi} = \begin{cases} 1, & \text{если в } i - \text{ом периоде через ННГУ сбрасывается расход } Q; \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (5)$$

Для решения задачи исследуется возможность водохранилища для накопления необходимых объемов воды при выполнении ограничений ГУ.2 и ГУ.3, для чего строится совокупность кривых свободной поверхности воды (СПВ) на участке при разных расходах ННГЭС и отметках уровней воды в створе ННГУ [11]. Построение кривых СПВ выполняется по методу Н.Н. Павловского. При расчете кривых СПВ

применяются уравнения неравномерного движения, учитывающие действие силы тяжести и линейные потери напора в условиях зависимости модуля сопротивления от среднего уровня воды на расчетном участке. Результаты расчета представлены в виде кривых СПВ на исследуемом участке (рисунок 1) и в таблицах 2, 3, в которых приведены величины объемов воды в водохранилище, в том числе дополнительных при отметках уровней в диапазоне 68,0 – 68,5 м БС в зависимости от подаваемых расходов с ННГЭС.

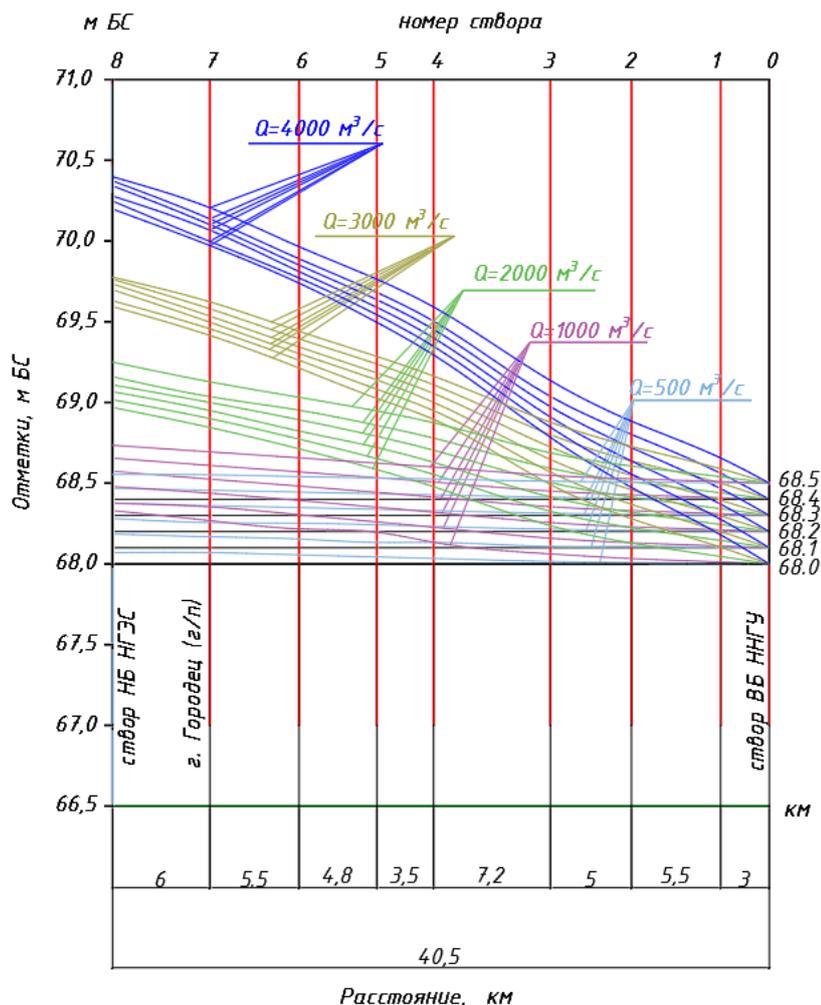


Рис. 1. Кривые свободной поверхности воды на участке ННГУ – ННГЭС

Расчет кривых СПВ, их графическое представление, а также анализ полученных результатов по изменению уровней воды в водохранилище и связанных с этим изменением выработки мощности Нижегородской ГЭС позволяют сделать следующие выводы:

1. При отсутствии регулирования в створе ННГУ (отметка верхнего бьефа (ВБ) ННГУ 68,0 м БС) уровни в створе НБ ННГЭС при расходах 500 - 4000 м³/с повышаются на 8,8 - 219,8 см.

2. При регулировании стока в створе ННГУ (отметка ВБ ННГУ 68,1 - 68,5 м БС) уровни в створе НБ ННГЭС в сопоставимых условиях повышаются на несколько большую величину, чем при отсутствии регулирования. Однако интенсивность

повышения уровня воды (УВ) в створе НБ ННГЭС при увеличении УВ в створе ВБ ННГУ и увеличении входного расхода замедляется. Так, при повышении отметки 68,0 м БС на 10 см в створе ННГУ, в створе ННГЭС по сравнению с «базовыми» условиями, т.е. без регулирования, отметка повышается на 9,7 см при расходе 500 м³/с и на 3,2 см при расходе 4000 м³/с. Расчеты кривой свободной поверхности показали, что при повышении отметки 68,0 м БС (в качестве примера) на 40 см в створе ВБ ННГУ, в створе ННГЭС по сравнению с «базовыми» условиями отметка повышается на 38,1 см при расходе 500 м³/с и на 13,2 см при расходе 4000 м³/с.

3. Изменение уровней воды в ВБ и НБ ННГЭС, ВБ ННГУ сказывается на изменении напора и, как следствие, на выработке мощности ННГЭС:

$$N = g \times Q \times H \times \eta_T \times \eta_G \quad (6)$$

где: N – среднечасовая мощность Нижегородской ГЭС, кВт;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

Q – расход, пропускаемый через турбины, м³/с;

H – напор, м;

η_m – коэффициент полезного действия (к.п.д.) турбин (принят 0,85);

η_g – коэффициент полезного действия (к.п.д.) генераторов (принят 0,96).

Таким образом, с понижением УВ в ВБ ННГЭС (Горьковское водохранилище) в сопоставимых условиях выработка мощности понижается. С повышением отметки УВ в створе ВБ ННГУ выработка мощности также снижается. С повышением расхода через ННГЭС разница в выработке мощности при экспериментальных значениях УВ увеличивается. Ниже в таблице 1 приведены сравнительные показатели снижения мощности Нижегородской ГЭС при сработке Горьковского водохранилища при эксплуатации водохранилища ННГУ в проектных (без регулирования) и предлагаемых (с введением регулирования) условиях.

Таблица 1

Снижение выработки мощности Нижегородской ГЭС при различных вариантах наполнения Горьковского водохранилища и водохранилища Нижегородского низконапорного гидроузла

№ п/п	УВ ВБ ННГЭС, мБС	УВ ВБ ННГУ, мБС	Расход с ННГЭС, м ³ /с	Мощность ГЭС, мВт	Разница, мВт	Разница, %
1	84,0	68,0	500	63,648	1,598	2,51
2	83,6	68,0	500	62,05		
3	84,0	68,0	4000	441,696	12,796	2,90
4	83,6	68,0	4000	428,90		
5	84,0	68,5	500	61,744	1,6	2,59
6	83,6	68,5	500	60,144		
7	84,0	68,5	4000	435,264	12,8	2,94
8	83,6	68,5	4000	422,464		

По результатам расчета можно сделать вывод о том, что при сработке Горьковского водохранилища и функционировании водохранилища ННГУ в проектных условиях (отметка ВБ ННГУ 68,0 мБС) мощность ННГЭС снизится не более чем на 3 %.

Введение регулирования по сравнению с проектными условиями (позиции пар 1-5, 2-6, 3-7, 4-8 таблицы 1) незначительно увеличат потери мощности ГЭС, которая в абсолютном значении составит 3,0-6,4 мВт и относительно до 3 %. Расчет выполнялся для наиболее неблагоприятных условий (при отметке ВБ ННГУ 68,5

мБС), при этом исследования показали, что предлагаемое внутрисуточное регулирование возможно осуществлять при более низких отметках в водохранилище ННГУ, а соответственно, и потери мощности ННГЭС будут меньше. Тем не менее, такие результаты ставят задачу обоснования требуемых расходов воды через гидроагрегаты ГЭС для выработки плановой мощности, что в условиях отсутствия данных по уровням воды в створе НБ ННГЭС (при определении напора) требует разработки эмпирических подходов.

Обеспечение непревышения допустимых уровней воды у гидроузла (ГУ.3), достигается при в определении объемов воды на водохранилище выше бытовой кривой свободной поверхности воды с отметкой 68,0 м БС в створе ННГУ и установлении соответствия между накопленными объемами и отметкой уровня. При этом накопленный объем фиксируется в течение всех суток в зависимости от расходов воды через ННГЭС и ННГУ.

На основании расчетов кривых свободной поверхности воды (рисунок 1) получены объемы воды в водохранилище V [13], в том числе дополнительные ΔV при отметках УВ в створе ННГУ выше проектной ($Z_{\text{ннгу}} > 68,0$ м БС) в зависимости от подаваемых расходов с ННГЭС $Q_{\text{ннгэс}}$.

Результаты расчетов сведены в таблицы 2 и 3.

Таблица 2

Объемы воды в водохранилище над отметкой 68,0 м БС при отметках УВ 68,0 - 68,5 м БС в створе ННГУ в зависимости от подаваемых расходов с ННГЭС, млн. м³

$Q_{\text{ннгэс}}, \text{м}^3/\text{с}$	$Z_{\text{ннгу}}, \text{м БС}$					
	68,0	68,1	68,2	68,3	68,4	68,5
500	1,87	6,19	10,09	14,76	19,02	23,27
1000	7,21	11,18	15,16	19,19	23,18	27,13
2000	24,19	27,49	29,58	32,73	35,89	39,78
3000	41,51	44,21	46,95	49,60	52,43	55,27
4000	61,24	64,10	66,71	69,35	72,12	74,64

Таблица 3

Дополнительные объемы воды в водохранилище при отметках УВ 68,0 - 68,5 м БС в створе ННГУ в зависимости от подаваемых расходов с ННГЭС, млн. м³

$Q_{\text{ннгэс}}, \text{м}^3/\text{с}$	$Z_{\text{ннгу}}, \text{м БС}$					
	68,0	68,1	68,2	68,3	68,4	68,5
500	0	4,32	8,22	12,88	17,15	21,40
1000	0	3,96	7,95	11,97	15,96	19,91
2000	0	3,30	5,38	8,53	11,70	15,58
3000	0	2,70	5,45	8,09	10,92	13,76
4000	0	2,86	5,48	8,11	10,88	13,40

Полученные результаты показывают, что при отметке ВБ ННГУ 68,5 м БС возможно накопить до 21,40 млн. м³. При анализе объемов нехватки воды в провальные часы в навигацию 2017 года получен вывод о том, что для осуществления регулирования достаточно и 12,88 млн. м³, то есть регулирование при выполнении ГУ.2 возможно осуществить при превышении уровня воды в водохранилище ННГУ не более чем на 30 см, то есть до отметки 68,30 мБС.

Решение задачи по разработанной математической модели (1) – (5) имеет многовариантный характер и обладает большой трудоемкостью. Результатом анализа способов решения могут являться следующие подходы:

1. Эвристический подход с решением в виде трехступенчатого графика сбросов расходов через ННГУ:

Предложено: по результатам обработки статистических материалов сутки разбить на три периода с 0 – 10 часов, с 10 до 15 часов, с 15 до 24 часов.

В первом периоде назначаются расходы с учетом переходящих объемов воды с предыдущих суток для покрытия нехватки воды в этом периоде и максимальным приближением расхода ННГУ к среднесуточному значению для неперевышения критических объемов. Затем назначаются расходы ННГУ в третьем периоде с учетом накопления переходящего объема воды на следующие сутки и неперевышением критических объемов в периоде и обеспечением транспортного попуска.

Во втором периоде назначаются расходы ННГУ из условия выполнения транзитности стока.

2. Подход с результатом решения в виде двухступенчатого графика сбросов расходов через ННГУ аналогичен первому (в виде трехступенчатого графика) подходу с объединением второго и третьего периода (по возможности).

Для реализации предложенного режима решается задача регулирования стока затворами ННГУ в условиях совпадения моментов регулирования с началом – окончанием принятых параметров по времени и величине расходов в соответствии с их трехступенчатой формой. В случае если запасов воды в водохранилище ННГУ достаточно, второй и третий периоды объединяются, и строится двухступенчатый график.

Укрупненный алгоритм решения задачи регулирования стока в статье представлен в виде последовательности действий (операций), исходя из следующих соображений:

1. Первый этап сводится к получению исходных данных с Нижегородской ГЭС. По плановым часовым выработкам мощности ННГЭС на предстоящие сутки формула (6) и разработанным уравнениям регрессии связи расхода воды и мощности ГЭС с учетом уровней верхнего и нижнего бьефов определяются часовые расходы, поступающие с ННГЭС. Расчет проводится для всей вариации суточных мощностей и по получившимся значениям строится суточный гидрограф ГЭС.

2. Внутрисуточное регулирование величины сбрасываемых расходов через ННГУ возможно в ситуациях, когда избытком объемов воды над среднесуточным значением покрывается их недостаток в «провальные» (ночные – утренние) часы. В связи с тем, что «провальные» расходы предшествуют избыточным и временные рамки текущих суток не позволяют использовать накопившиеся объемы воды на покрытие дефицитов, нужно заранее создавать для этого необходимый запас.

В ситуации малой водности внутрисуточное регулирование может не решить вопрос обеспечения необходимого транспортного попуска, а лишь в определённой степени ослабить негативное влияние «провальных» попусков через ННГЭС. Обеспечение транспортного попуска в таких ситуациях возможно за счет накопления воды в предыдущие периоды большей водности с максимальным приближением момента накопления запаса воды к маловодному периоду. Так, по результатам анализа стока через ННГЭС в навигацию 2017 г. дефицит (избыток) воды на покрытие транспортного попуска в ночные - утренние часы составил: за май ÷ июнь - избыток 20 - 55 млн. м³, за август ÷ ноябрь - дефицит 4 - 6 млн. м³. Проведённые расчеты с выполнением требований неперевышения предельных уровней воды в створе ННГУ показали, что переходящий запас составляет около 10 млн. м³.

В условиях большой водности регулирование целесообразно для снижения амплитуды колебания уровня воды НБ ННГУ с учетом неперевышения критических значений объемов воды на водохранилище ННГУ.

Для обоснования переходящих объемов воды анализируются статистические ряды ее нехватки, определяется обеспеченность этой нехватки методами математической статистики и теории вероятностей [12].

3. По предложенным выше подходам решается задача назначения величины сбрасываемого через ННГУ расхода воды в i -х периодах.

Результаты

Решение задачи внутрисуточного регулирования сброса воды через ННГУ апробировано на конкретных гидрологических материалах участка нижнего бьефа ННГЭС и в качестве примера приведены гидрографы и графики колебания уровней воды на 10.10.2017 г. (рисунки 2, 3). При этом на рисунке 2 представлены решения по трехступенчатому регулированию уровня воды (которое планируется осуществлять в более критических ситуациях с целью снижения отметки уровня накопленной воды в верхнем бьефе ННГУ). Однако учитывая, что входные расходы воды с ННГЭС на конкретные сутки (на 10.10.2017 г.) и объемы накопленной воды для осуществления регулирования не превышают предельных отметок уровня воды в верхнем бьефе ННГУ (граничное условия (ГУ.3) выполняется), возможно ввести (для упрощения решений по эксплуатации) двухступенчатое регулирование, пример регулирования которого представлен на рисунке 3.

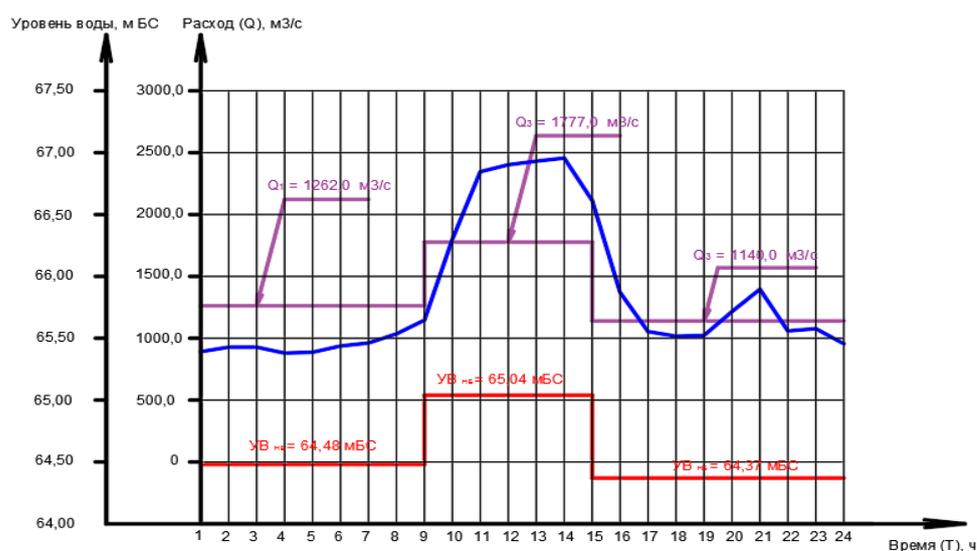


Рис. 2. График хода расходов ННГЭС, ННГУ и уровней воды нижнего бьефа ННГУ при суточном регулировании на примере 10.10.2017 г. (трехступенчатый график регулирования стока)

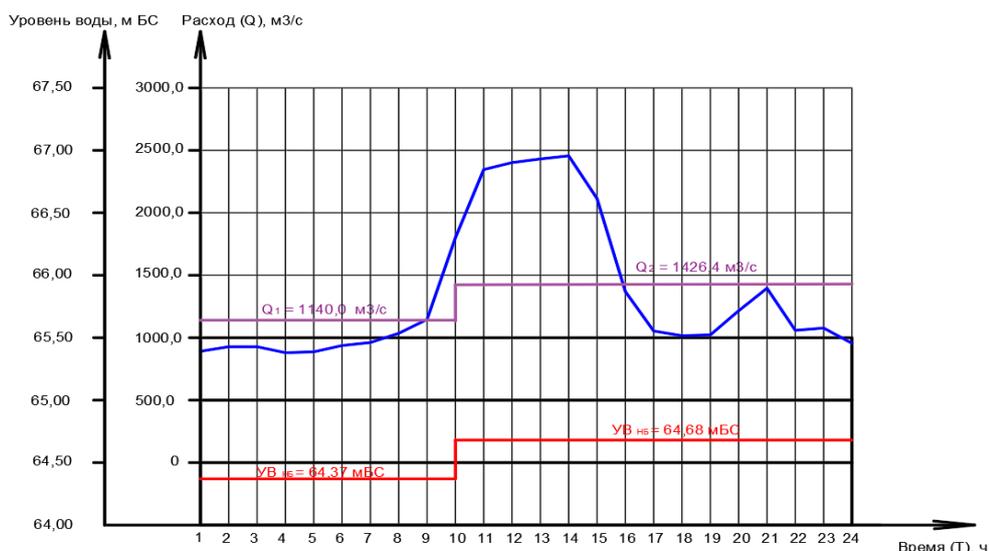


Рис. 3. График хода расходов ННГЭС, ННГУ и уровней воды нижнего бьефа ННГУ при суточном регулировании на примере 10.10.2017 г. (двухступенчатый график регулирования стока)

Оценивая параметры хода расходов и уровней воды в бьефах ННГУ, возможно сделать вывод о достижении введением внутрисуточного регулирования их более сглаженного характера в сравнении с проектными условиями (без регулирования).

Заключение

Таким образом, при введении мероприятий по регулированию входных расходов на водосливе ННГУ по разработанной модели решаются следующие задачи:

1. В периоды «провальных» расходов, поступающих с Нижегородской ГЭС (ниже значений транспортного пускка) путем подачи накопленного объема воды можно достичь повышения отметок уровня воды и, соответственно, глубин участка, что позволит в комплексе с диспетчерским регулированием движения флота улучшить условия судоходства в нижнем бьефе низконапорного гидроузла.

2. Подача в НБ ННГУ более равномерных расходов снизит интенсивность негативного влияния осветленного потока на русловые деформации участка реки [14, 16, 17]. Работой [15] оценен эффект с точки зрения устойчивости НБ ННГУ при снижении амплитудных характеристик таких параметров как расход и уровень воды, скорость течения и сделан вывод о весьма положительном эффекте предложенных решений при минимальных эксплуатационных затратах.

Литература

1. Агеев, С.О. Анализ проблемных вопросов безопасности судоходства на участке Городец – Нижний Новгород до и после строительства Нижегородского низконапорного гидроузла / С.О. Агеев, М.А. Матюгин // Труды конгресса «Великие реки - 2017». Вып. 6. – Н. Новгород: Изд – во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2017. – с.1-4.
2. Строительство Нижегородского низконапорного гидроузла. Проектная документация. Этап проектных работ. Корректировка материалов инженерных изысканий по замечаниям ФАУ «Главгосэкспертиза России». Инженерно-гидрометеорологические изыскания. Откорректированный отчет -ООО «ВОЛГАЭНЕРГОПРОЕКТ», 2017. –174 с.

3. Агеев, С.О. Анализ изменений навигационных расходов через Нижегородскую ГЭС в навигацию 2017 года и рекомендации по улучшению водного режима участка р. Волги ниже створа Нижегородского низконапорного гидроузла (ННГУ) / С.О. Агеев // Труды конгресса «Великие реки - 2018». Вып. 7. – Н. Новгород: Изд – во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2018. – с. 1 - 7.
4. Агеев, С.О. Регулирование сброса воды на неразмываемой модели в состоянии подпора / С.О. Агеев, А.Н. Ситнов // Труды конгресса «Великие реки - 2019». Вып. 8. – Н. Новгород: Изд – во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2019. – с. 1 - 5.
5. Агеев, С.О. Обоснование целесообразности суточного регулирования стока низконапорным гидроузлом. / С.О. Агеев // Научные проблемы водного транспорта. Вестник ВГАВТ. Вып. 62. - Н. Новгород: Изд – во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2020. – с. 136 - 146.
6. Агеев, С.О. Результаты расчета параметров суточного регулирования стока в створе низконапорного гидроузла и оценка его эффективности. / С.О. Агеев // Морской регистр, 2020. – с. 136 - 146.
7. Агеев, С.О. Методические подходы решения вопросов поддержания безопасных условий судоходства в нижнем бьефе Нижегородского низконапорного гидроузла/ С.О. Агеев, А.Н. Ситнов // Труды конгресса «Великие реки - 2020». Вып. 8. – Н. Новгород: Изд – во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2020. – с. 1 – 5.
8. Ситнов, А.Н. Обоснование параметров обеспеченности водохозяйственных балансов и режима работы водохранилища Нижегородского низконапорного гидроузла / А.Н. Ситнов, Н.В. Кочкурова, Д.А. Мильцын // Вестник ВГАВТ. Вып. 50. - Н. Новгород: Изд–во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2017. – с. 23-31.
9. Строительство Нижегородского низконапорного гидроузла. Этап проектных работ. Моделирование гидравлических режимов р. Волги на участке от Нижегородской ГЭС до г. Н. Новгород. Отчет 0715-000-ГИД4-1.1.01/09.14 - ОАО «ИНЖЕНЕРНЫЙ ЦЕНТР ЭНЕГЕТИКИ ПОВОЛЖЬЯ», 2015. – 76 с.
10. Строительство Нижегородского низконапорного гидроузла. Проектная документация. Этап 2. 16-ти пролётная водосбросная плотина с 6-ти пролётным водосбросом-регулятором, с сопряжениями, эксплуатационной автодорогой по гребню, подкрановыми путями, подводящим и отводящим каналами. 001-РР-2-1.01/06.17. -ООО «ВОЛГАЭНЕРГОПРОЕКТ», 2017. – 129 с.
11. Агеев, С.О. Расчет кривых свободной поверхности воды в водохранилище ННГУ с целью обоснования резервного объема воды для осуществления регулирования / С.О. Агеев, А.Н. Ситнов, В.В. Агеева, Ю.А. Градинар // X Всероссийский фестиваль науки [Электронный ресурс]: сборник докладов. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2020. – с. 40 – 44 с.
12. The Theory of Storage. By P. A. P. Moran (Methuen's Monographs on Applied Probability and Statistics). [Pp. 111. London: Methuen and Co. Ltd. New York: Wiley and Sons, Inc., 1959. 13s. 6d.]
13. S. Dutta. Determination of Reservoir Capacity Using Linear Programming / S. Dutta // VIT University, Vellore, Tamil Nadu, India, 2015 – s. 9549 - 9556.
14. Habel, M. Dynamics of the Vistula River chane nel deformations downstream of the Włocławek Reservoir. Wyd. UKW w Bydgoszczy. 2013. S. 138.
15. Агеев, С.О. Мероприятия по снижению негативного воздействия на нижний бьеф нижегородского низконапорного гидроузла / С.О. Агеев, А.Н. Ситнов, В.В. Агеева, Ю.А. Градинар // Труды 5-й всероссийской научной конференции «ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ ВОЛЖСКОГО БАССЕЙНА» («ВОЛГА 2020»). Выпуск 3. - Н. Новгород: Изд–во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2020 – с. 1-5.
16. Graf WL, Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American riversl, Geomorphology/ 79, 2006 - s. 336–360.
17. Simon A. Adjunsment and recovery of unstable alluvial channels: identification and approaches for engineering management// Earth Surface Processes and Landforms. Vol. 20. 1995.

References:

1. Ageev S.O., MatyuginM.A. «Analysis of the problematic issues of shipping safety on the Goro-dets-Nizhny Novgorod section before and after the construction of the Nizhny Novgorod low-pressure hydraulic system»V sbornike: Trudy 19-go mezhdunarodnogo nauchno-

- promyshlennogo foruma «Velikie reki-2017». Web. 07 Sep. 2019 < <http://www.вф-рекаморе.рф/> >
2. Construction of the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric complex. Project documentation. Stage of design work. Hydrometeorological engineering surveys. Corrected report /Volgaenergoproekt. –Samara, 2017 – 174 p.
 3. Ageev, S.O. «Analysis of changes in navigation costs through the Nizhny Novgorod Hydroelectric Power Station in the navigation of 2017 and recommendations for improving the water regime of the r. Volga below the alignment of the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric complex (NNSU)» V sbornike: Trudy 20-go mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma «Velikie reki-2018»
 4. Ageev, S.O. «Regulation of water on nerazmyvaemoy models able to Prop» V sbornike: Trudy 19-go mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma «Velikie reki-2019»
 5. Ageev, S.O. «Drain regulation of low-headed hydraulic unit» Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta 62 (2020): p. 136–146.
 6. Ageev, S.O. «Results of calculation of daily flow regulation parameters in the range of a low-pressure hydraulic unit and its efficiency evaluation» Research bulletin by russian maritime register of shipping (2020): p. 136 - 146
 7. Ageev, S.O. «Methodological approaches to solving the safety conditions of navigation in the lower beef of the nizhny novgorod lowpressure hydraulic unit» V sbornike: Trudy 20-go mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma «Velikie reki-2020»
 8. Sitnov, A.N. «Substantiation of the parameters of the supply of water balances and the operation mode of the reservoir of the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric complex» Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta 50 (2017): p. 23–31
 9. Construction of the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric complex. Stage of design work. Modeling of hydraulic regimes of the Volga river on the section from the Nizhny Novgorod hydroelectric power station to the city of Nizhny Novgorod / Volga region energy engineering center, 2015 – 76 p.
 10. Construction of the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric complex. Project documentation. Stage 2. 16-span spillway dam with 6-span spillway regulator, with interfaces, operational highway along the ridge, crane tracks, supply and discharge channels /Volgaenergoproekt, 2017 – 129 p.
 11. Ageev, S.O. «Calculation of free water surface curves in the reservoir of the UNN state university for the purpose of justification reserve volume of water for regulation»
 12. The Theory of Storage. By P. A. P. Moran (Methuen's Monographs on Applied Probability and Statistics). [Pp. 111. London: Methuen and Co. Ltd. New York: Wiley and Sons, Inc., 1959. 13s. 6d.]
 13. S. Dutta. Determination of Reservoir Capacity Using Linear Programming / S. Dutta // VIT University, Vellore, Tamil Nadu, India, 2015 – s. 9549 - 9556.
 14. Habel, M. Dynamics of the Vistula River chane nel deformations downstream of the Włocławek Reservoir. Wyd. UKW w Bydgoszczy. 2013. S. 138.
 15. Ageev, S.O. «Interventions to reduce the negative impact on the downstream reach of the nizhegorodskiy low head hydropower plant»
 16. Graf WL, Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American riversl, Geomorphology/ 79, 2006 - s. 336–360.
 17. Simon A. Adjusment and recovery of unstable alluvial channels: identification and approaches for engineering management// Earth Surface Processes and Landforms. Vol. 20. 1995.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ситнов Александр Николаевич, профессор, д.т.н., заведующий кафедрой водных путей и гидротехнических сооружений, Волжский государственный университет водного транспорта 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: stnv1952@rambler.ru.

Агеев Сергей Олегович, главный геолог

Alexander N. Sitnov, Doctor in Engineering Science, head of the Department of waterways and hydraulic structures, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951, Russia

Sergey O. Ageev, Chief geologist (deputy chief)

(заместитель начальника) службы главного маркшейдера, Администрация Волжского бассейна внутренних водных путей (ФБУ «Администрация Волжского бассейна»), 603001 г. Нижний Новгород, ул. Рождественская, д. 21 «Б», e-mail: gg6258@yandex.ru. of the service of the chief surveyor, The Administration Of The Volga Pool Of Internal Waterways, 21 «B», Rozhdestvenskaya st, Nizhniy Novgorod, 603001

Статья поступила в редакцию 22.01.2021; опубликована онлайн 23.03.2021.
Received 22.01.2021; published online 23.03.2021.

ВОДНЫЕ ПУТИ, ПОРТЫ И ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

УДК 627.335.2

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi66.162>

Влияние расположения разгрузочных свай в обратной засыпке на напряженно-деформированное состояние больверка

Д. А. Подкорытова

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6955-9828>

*Сибирский государственный университет водного транспорта (СГУВТ), г.
Новосибирск, Россия*

Аннотация: Данная статья посвящена реконструкции и усилению сооружений типа больверк. В работе описан расчет активного давления грунта на причальную стенку типа больверк при усилении последней разгрузочными сваями в обратной засыпке стенки. Целью работы является оценка изменения степени воздействия активного давления грунта при изменении расстояния от разгружающих свай до причальной стенки. Для этого автором выполнен расчет, в ходе которого выявлены и показаны с помощью номограмм и графиков зависимости активного давления грунта от основных характеристик грунта, шага разгрузочных свай, величины угла внутреннего трения, расстояния от разгрузочных свай до стенки; рассмотрены варианты с перекрытиями зон разгрузки и без перекрытий; получены коэффициенты снижения нагрузки при различных условиях работы конструкций. Предложенный расчет позволяет оценить разгрузочный эффект от использования свай в обратной засыпке существующих причальных стенок типа больверк.

Ключевые слова: больверк, усиление, свая, обратная засыпка, шпунт, причальная стенка, реконструкция, несущая способность

Influence of the location of unloading piles in backfill on the stress-strain state of the bolverk

Daria. A. Podkorytova

Siberian State University of Water Transport (SSUWT), Novosibirsk, Russia

Abstract. This article is devoted to the reconstruction and strengthening of structures of the bolverk type. The paper describes the calculation of the active ground pressure on the berth wall of the bolverk type when the latter is reinforced by unloading piles in the backfill of the wall. The aim of the work is to assess the change in the degree of impact of active ground pressure when changing the distance from the unloading piles to the mooring wall. The author performed calculations to reveal and show in the form of nomograms and graphs the dependence of active soil pressure on the main characteristics of the soil, spacing of discharge piles, the angle of internal friction, the distance from the unloading of the piles to the wall. The options with overlapping discharge zones and non-overlapping ones are considered; the coefficients of reducing the load under various operating conditions of the structures are obtained. The proposed calculation allows us to estimate the unloading effect of the use of piles in the backfill of existing berth walls of the bolverk type.

Keywords: bolverk, reinforcement, pile, backfill, sheet piling, quay wall, reconstruction, load bearing capacity.

Введение

Утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 29 февраля 2016 г. «Стратегия развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года» предполагает увеличение объема перевозок грузов внутренним водным транспортом. В соответствии с принятой «Стратегией» основной задачей в части развития портовой инфраструктуры является повышение ее надежности и безопасности посредством разработки и реализации комплексных проектов реконструкции гидротехнических сооружений [1]. Планируемое возрастание грузооборота на речном транспорте связано с необходимостью увеличения загрузки прикормонных складских площадей и установкой мощной перегрузочной техники, что в свою очередь приводит к росту нагрузок на причальные стенки. Однако большинство портовых сооружений введено в эксплуатацию более 56 лет назад, многие требуют проведения капитального ремонта. Свыше 50% портовых гидротехнических сооружений находятся в эксплуатации 50-75 лет и более [2].

В этих условиях особое значение приобретают вопросы эффективного использования существующих причальных сооружений. Повышение эффективности использования существующих портовых сооружений может быть осуществлено на основе выявления резервов их несущей способности с целью увеличения пропускной способности портов и повышения несущей способности существующих причалов [3,4,6,7-15].

Расчет уменьшения давления в створе разгрузочной сваи

Изменяя структуру обратной засыпки путем формирования свай, можно добиться изменения угла внутреннего трения грунта обратной засыпки, что повлечет изменение активного давления грунта на сооружение [5].

В качестве примера рассмотрим возможности усиления причальной стенки в виде одноанкерного больверка из металлического шпунта свободной высотой 13 м, глубиной забивки шпунта 7 м, с анкерными тягами, установленными с шагом 1,7 м по всему фронту сооружения (рис. 1). Грунт основания и обратной засыпки – песок средней крупности с углом внутреннего трения $\varphi = 30^\circ$, удельным весом $\gamma = 15 \text{ кН/м}^3$. Разгружающие сваи устанавливаются в пространства между анкерными тягами с шагом 1,7 м. Глубина погружения свай устанавливается на уровне ниже призмы обрушения грунта на 0,5-1 м.

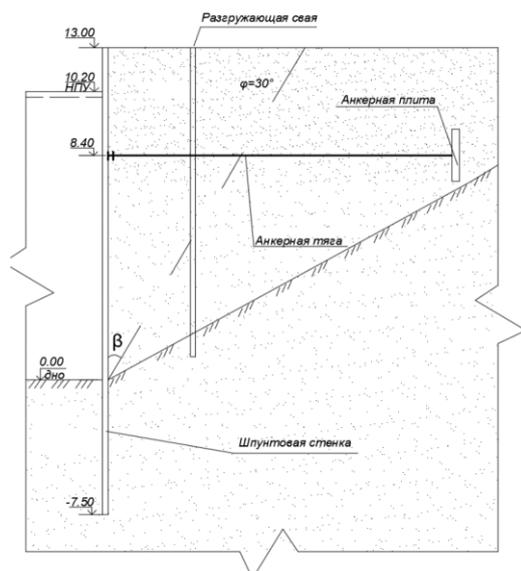
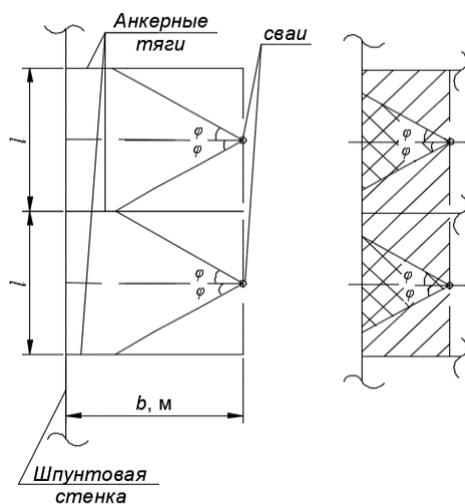


Рис. 1. Одноанкерный больверк с разгружающей свайей

В зависимости от планового расстояния между сваями и положения свай относительно стенки будут меняться площади экранированных и неэкранированных участков грунта обратной засыпки (рис. 2)



- l - шаг анкерных тяг
- φ - угол внутреннего трения грунта
- ▨ неэкранируемый участок
- ▣ экранируемый участок
- b - расстояние до причальной стенки

Рис. 2. Схема планового расположения экранированных и неэкранированных участков грунта обратной засыпки

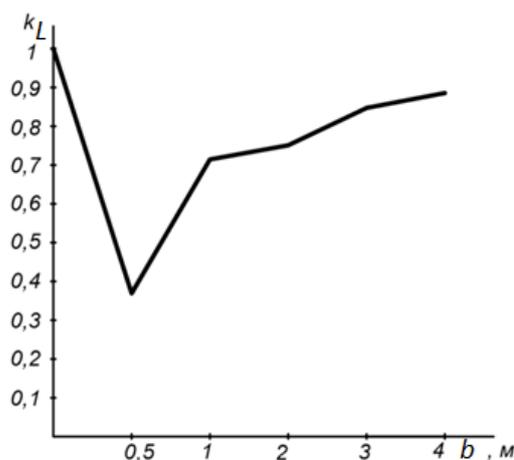


Рис. 3. График изменения коэффициента k_L в зависимости от расстояния между стенкой и сваяй

Таким образом, из графика видно, что оптимальное расстояние свайного ряда до стенки составляет 0,5 - 4 м.

При разгрузке сваями величина активного давления грунта изменяется. Уменьшение эпюры активного давления грунта показано на рисунке 4.

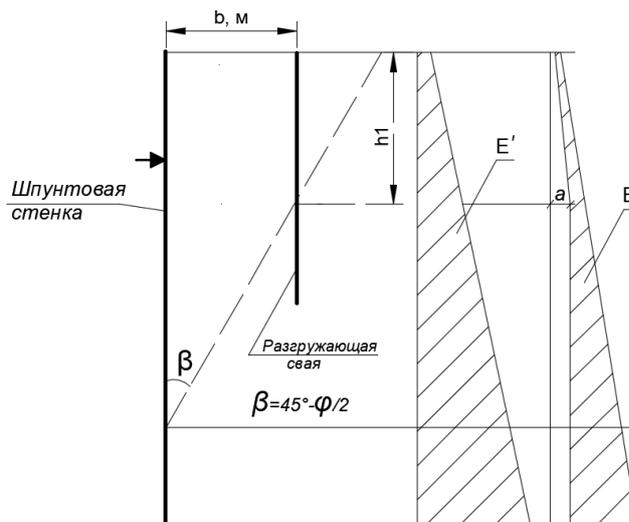


Рис. 4. – Изменение эпюры активного давления грунта

Интенсивность активного давления грунта в точке, отстоящей на расстояние h_1 (рис. 4) от поверхности грунта равна:

$$a = \gamma h_1 \lambda_a \quad (1)$$

где λ_a - коэффициент активного давления грунта;

Коэффициент λ_a при горизонтальной поверхности засыпки, вертикальной стенке и угле трения грунта о стенку $\delta = 0$ определяется по формуле [4]:

$$\lambda_a = \operatorname{tg}^2(45^\circ - \varphi/2), \quad (10)$$

где φ - угол внутреннего трения грунта засыпки.

Давление на стенку при отсутствии разгрузки определяется как площадь эпюры (рис. 4):

$$E = \frac{ah}{2} = \left(\frac{q\lambda_a + (q + \gamma h)\lambda_a}{2} \right) h = q\lambda_a h + \frac{\gamma h^2 \lambda_a}{2} \quad (3)$$

Давление по всему фронту сооружения:

$$E_{\text{полн}} = E \cdot L \quad (4)$$

где L – длина сооружения по фронту.

Уменьшение давления в створе разгрузочной сваи в точке a , где выклинивается плоскость естественного откоса, проведенная от сваи, считается как сумма площадей эпюр (рис. 4):

$$E' = \frac{ah_1}{2} + a(h - h_1) = a \left(h - \frac{h_1}{2} \right) \quad (5)$$

Толщина грунта, экранированного свайей h_1 (рис. 5), равна

$$h_1 = b \cdot ctg \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (6)$$

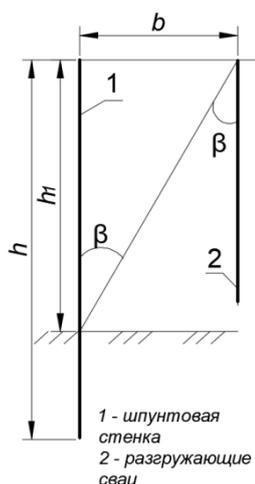


Рис. 5. Толщина грунта, экранированного свайей

Таким образом уменьшение давления будет равно

$$E' = \gamma b \cdot ctg \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \lambda_a \left[h - \frac{b}{2} ctg \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right] \quad (7)$$

Расчет уменьшения давления в промежутках между разгрузочными сваями

Рассмотрим, как меняется давление в промежутках между сваями в плановом направлении.

Возможны два варианта, реализация которых определяется характеристиками грунта обратной засыпки. В зависимости от угла внутреннего трения грунта возможно перекрытие зон разгрузки от свай (рис.7) или нет (рис. 6).

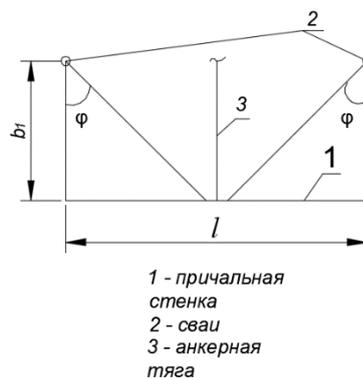


Рис. 6. Схема изменения давления без перекрытия зон разгрузки от свай

Если нет перекрытия, то полный разгрузочный эффект составит

$$E'_{\text{пер}} = b_1 \cdot tg\varphi \tag{8}$$

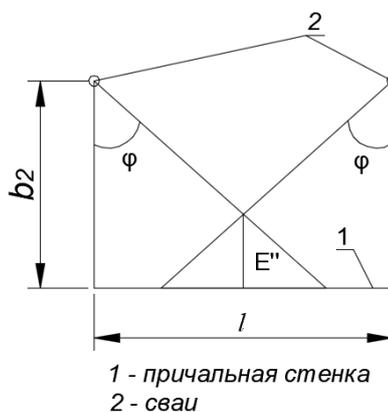


Рис. 7. Схема изменения давления с перекрытием зон разгрузки от свай

В случае перекрытия зон разгрузки полный разгрузочный эффект можно определить по зависимости

$$\frac{E'_{\text{пер}}}{E''} = (b_2 \cdot tg\varphi) / (b_2 \cdot tg\varphi - l/2) \tag{9}$$

После некоторых преобразований получим

$$\begin{aligned} E'_{\text{пер}} &= 2 \frac{E'' + E' l}{2} \frac{l}{2} = \left[\frac{E' \cdot (b_2 \cdot tg\varphi - \frac{l}{2})}{b_2 \cdot tg\varphi} + E' \right] \cdot \frac{l}{2} = \\ &= \left[E' - \frac{l}{2b_2 \cdot tg\varphi} E' + E' \right] \cdot \frac{l}{2} = \left[2E' - \frac{lE'}{2b_2 \cdot tg\varphi} \right] \frac{l}{2} = \\ &= \left[E' l \left(1 - \frac{l}{4b_2 \cdot tg\varphi} \right) \right] = \\ &= \gamma b c t g \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \lambda_a \left(h - \frac{h_1}{2} \right) l \left(1 - \frac{l}{4b_2 \cdot tg\varphi} \right) = \end{aligned} \tag{10}$$

$$= \gamma b_2 ctg \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \lambda_a \left[h - \frac{b_2}{2} ctg \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \right] l \left(1 - \frac{l}{4b_2 \cdot tg \varphi} \right)$$

Коэффициент уменьшения активного давления грунта определим как соотношение значения уменьшения давления к значению активного давления на стенку без разгрузки.

Если нет перекрытий: $k_{б.п.} = \frac{\gamma b \cdot ctg \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \lambda_a \left(h - \frac{b}{2} ctg \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \right) b \cdot tg \varphi}{\lambda_a h \left(q + \frac{\gamma h}{2} \right) l}$ (11)

Если есть перекрытия: $k_{п} = \frac{\gamma b \cdot ctg \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \lambda_a \left(h - \frac{b}{2} ctg \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \right) l \cdot \left(1 - \frac{l}{4b \cdot tg \varphi} \right)}{\lambda_a h \left(q + \frac{\gamma h}{2} \right)}$

Оценка влияния расчетных параметров на общий разгрузочный эффект

Вернемся к полученной ранее зависимости (7) и попытаемся проанализировать степень влияния входящих в нее параметров на общий разгрузочный эффект. Для этого построим номограмму (рис. 8), позволяющую легко оценить роль каждого параметра. Изначально представим зависимость (7) в более компактной форме:

$$E' = \gamma b \left[\frac{h}{ctg \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right)} - \frac{b}{2} \right] \quad (12)$$

Приведенная номограмма позволяет легко оценить степень разгрузки бойверка в зависимости от характеристик грунта обратной засыпки и удаления разгрузочной сваи от фронта причала. Очевидно, что положительное влияние величины b на разгрузочный эффект может работать только в определенных пределах удаления сваи. Для оценки величины зоны удаления сваи, при которой наблюдается значительный разгрузочный эффект, проверим зависимость (7) на экстремум. Находим производную от выражения (7) и приравняем к нулю.

$$\frac{dE'}{db} = \gamma \lambda_a ctg \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) h - \gamma \lambda_a ctg^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) b = 0 \quad (13)$$

Отсюда получаем зависимость $\frac{b}{h}$ от φ , соответствующую максимальному разгрузочному эффекту:

$$\frac{b}{h} = \frac{1}{ctg \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)} \quad (14)$$

Полученные из формулы (14) результаты показаны на рис.9.

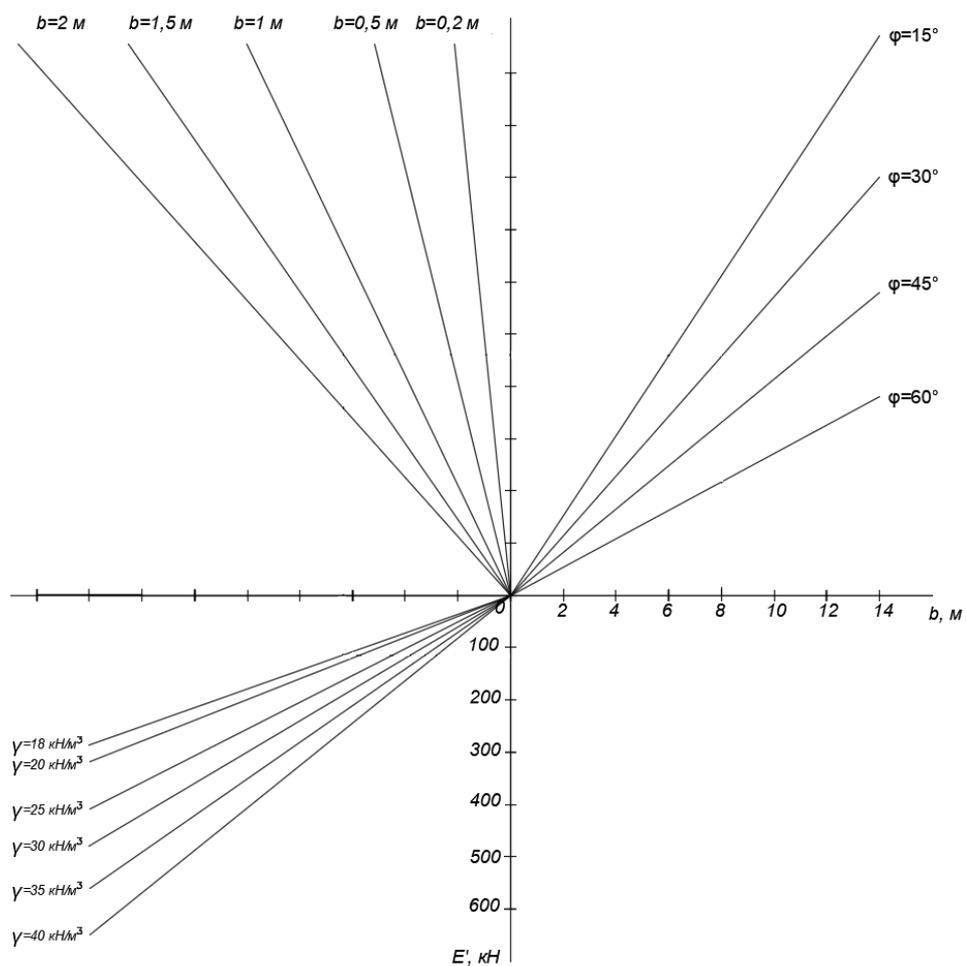
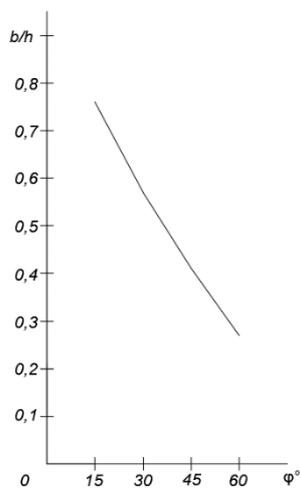


Рис. 8. Номограммы зависимости уменьшения активного давления грунта на стенку от различных параметров

Рис. 9. Зависимость эффективного соотношения расстояния сваи до стенки к глубине забивки сваи от угла внутреннего трения грунта



Анализ соотношения (7) также позволяет найти такое соотношение между величинами b и h , при котором разгрузочного эффекта не будет вовсе, для этого примем уменьшение нагрузки E' (7) равным нулю.

$$E' = \gamma b \lambda_a \cdot \operatorname{ctg} \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \left[h - \frac{b}{2} \operatorname{ctg} \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right] = 0$$

$$b = \frac{2h}{\operatorname{ctg} \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)} \quad (15)$$

Полученная зависимость также отображена на рис. 10.

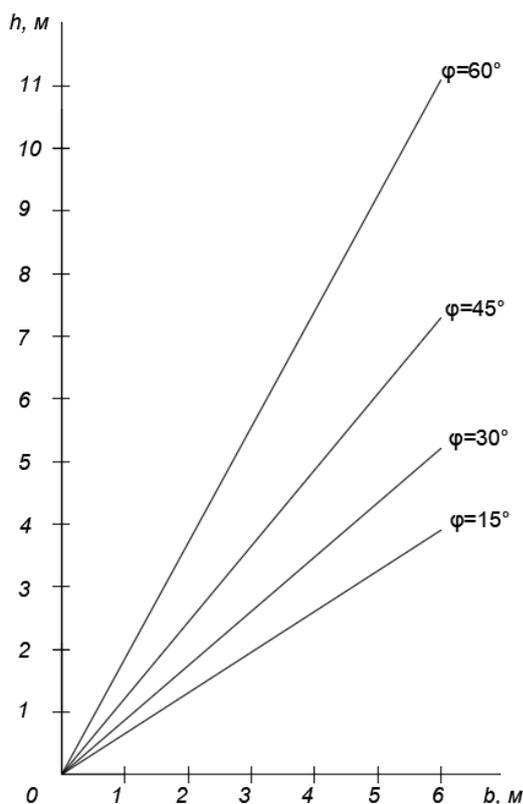


Рис. 10. Соотношение между глубиной забивки сваи и ее удаленностью от стенки, при котором свая перестает оказывать разгрузочное воздействие (для различных углов внутреннего трения грунта)

Заклучение

В результате вышеприведенного анализа работы разгрузочных свай выявлено влияние их расположения в обратной засыпке на степень сокращения нагрузок на больверк. Получены коэффициенты снижения нагрузки при различных условиях работы конструкций.

Литература

1. Распоряжение Правительства РФ от 29.02.2016 N 327-р Об утверждении Стратегии развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года
2. Бик Ю. И. Проблемы сохранения гидротехнических сооружений в речных портах Сибири/ Сборник научных трудов "Строительные конструкции и расчет гидротехнических сооружений в условиях проведения экономических реформ". - Новосибирск, 2002. - С. 4-5.
3. Удовиченко В.Н., Яковлев П.И., Морские и речные гидротехнические сооружения: учебник /М., "Транспорт", 1976, - 416 с.
4. А. Я. Будин Усиление портовых сооружений: учебник / А. Я. Будин, М. В. Чекренева.— М: Изд-во «Транспорт», 1983.— 179 с.
5. А. Я. Будин Тонкие подпорные стенки для условий Севера: учебник / А. Я. Будин — Ленинград: Изд-во «Стройиздат. Ленинградское отделение», 1982.— 288 с.
6. Елицур Д. В. Повышение эффективности использования остаточного ресурса реконструируемых причальных набережных в районах Сибири и Крайнего Севера : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.22.19 / Елицур Дмитрий Валерьевич; [Место защиты: Новосиб. гос. акад. водного транспорта]. - Новосибирск, 2007. - 17 с.
7. Шихиев, Ф. М. Кинематическая теория давления грунтов на причальные сооружения и другие типы жестких и гибких ограждений [Текст] : Автореферат дис. на соискание ученой степени доктора технических наук / Ленингр. ин-т водного транспорта. - Ленинград : [б. и.], 1965. - 37 с. : ил.
8. Подкорытова Д. А. Применение методов инъектирования в строительстве // Наука. Технологии. Инновации: сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции. – Стерлитамак, 2018 – С.91
9. Thoft Christensen P., Baker M.J. Structural reliability theory and its applications. Springer Verlag, 1982.
10. Joint Committee on Structural Safety. Basic notes on actions. Entwurf, April, 1984.
11. Kochel: Zuverlässigkeit technischer systeme. Leipzig: VEB Fachbuchverlag, 1982
12. Halmos E.E. Reinforced earth walls.-Concrete Products, vol.80, N 6, 1977.-p.30-33.
13. Benjamin I.R., Cornell C.Allin. Probability, statistics and decision for civil engineers. New York: McGraw-Hill Book Company, 1970.
14. Chang Y.C., Forsyth R. A. Desing and field behaviour of reinforced earth wall.- Proc.ASCE, J.Geotechn. Eng. Div., vol.103, N 7, 1977.-p.677-692.
15. Cornell C.A. A first-order reliability theory for structural desing. Cana-da: University of Waterloo, Solid Mechanics Division, Study N 3, Ontario.
16. Vidal H.C. United States Patent office. 3,570,253.Pa-tented Mar. 16, 1971. Constructional Works. Henri C. Vidal, 17 Rue Armengand, 92 st. Cloud, France.

References

1. Order of the Government of the Russian Federation of February 29, 2016 N 327-r On approval of the Strategy for the development of inland water transport of the Russian Federation for the period until 2030
2. Bik Yu. I. Problems of preserving hydraulic structures in the river ports of Siberia / Collection of scientific papers "Building structures and calculation of hydraulic structures in the context of economic reforms". - Novosibirsk, 2002 .-- S. 4-5.
3. Udovichenko VN, Yakovlev PI, Marine and river hydraulic structures: textbook / M., "Transport", 1976, - 416 p.
- A. Ya. Budin Strengthening of port facilities: textbook / A. Ya. Budin, MV Chekreneva. - M: Publishing house "Transport", 1983. - 179 p.
- B. Ya. Budin Thin retaining walls for the conditions of the North: textbook / A. Ya. Budin - Leningrad: Publishing house "Stroyizdat. Leningrad branch ", 1982. - 288 p.
4. Elitsur DV Increasing the efficiency of using the residual resource of reconstructed quayside embankments in Siberia and the Far North: abstract dis. ... candidate of technical sciences: 05.22.19 / Elitsur Dmitry Valerievich; [Place of protection: Novosib. state acad. water transport]. - Novosibirsk, 2007 .-- 17 p.

5. Shikhiev, FM Kinematic theory of soil pressure on berthing facilities and other types of rigid and flexible barriers [Text]: Abstract of the dis. for the degree of Doctor of Technical Sciences / Leningrad. Institute of water transport. - Leningrad: [b. and.], 1965. - 37 p. : ill.
6. Podkorytova DA Application of injection methods in construction. Science. Technologies. Innovation: a collection of articles on the results of the International Scientific and Practical Conference. - Sterlitamak, 2018 - p. 91
7. Thoft Christensen P., Baker M.J. Structural reliability theory and its applications. Springer Verlag, 1982.
8. Joint Committee on Structural Safety. Basic notes on actions. Entwurf, April, 1984.
9. Koehl: Zuverlässigkeit technischer systeme. Leipzig: VEB Fachbuchverlag, 1982
10. Halmos E.E. Reinforced earth walls.-Concrete Products, vol. 80, No. 6, 1977, p. 30 33.
11. Benjamin I. R., Cornell C. Allin. Probability, statistics and decision for civil engineers. New York: McGraw-Hill Book Company, 1970.
12. Chang Y.C., Forsyth R. A. Desing and field behavior of reinforced earth wall. Proc. ASCE, J. Geotechn. Eng. Div., Vol. 103, No. 7, 1977.-p. 677-692.
13. Cornell C.A. A first-order reliability theory for structural desing. Cana-da: University of Waterloo, Solid Mechanics Division, Study N 3, Ontario.
14. Vidal H.C. United States Patent office. 3,570,253.Pa-tented Mar. 16, 1971. Constructional Works. Henri C. Vidal, 17 Rue Armengand, 92 st. Cloud, France.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Подкорытова Дарья Александровна, Daria A. Podkorytova, postgraduate of the аспирант кафедры строительных конструкций Department of Building Structures and Water и охраны водных ресурсов, Новосибирский Resources Protection, Novosibirsk State государственный университет водного University of Water Transport, 33, Shtetinkina st, транспорта» (ФГБОУ ВО «СГУВТ»), 630099, г. Novosibirsk, 630099 Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: dariya9191@mail.ru

Статья поступила в редакцию 12.01.2021; опубликована онлайн 23.03.2021.
Received 12.01.2021; published online 23.03.2021.

**Научные проблемы
водного транспорта**

**Russian Journal of Water
Transport**

№66(1), 2021

Формат бумаги 70x180 1/16. Бумага офсетная.
Ризография. Усл. печ. л. 19,75. Уч.-изд. л. 27,65.
Заказ 041. Тираж 500.

Федеральное агентство морского и речного транспорта.
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ
ВО «ВГУВТ»)
Отпечатано в типографии издательско-полиграфического комплекса ФГБОУ ВО
«ВГУВТ». Адрес 603951, Российская Федерация, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

Свободная цена

Подписной индекс в каталоге
Агентства "Книга-Сервис"
70191

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)
Свидетельство ПИ № ФС77-77658 от 17 января 2020 г.

Научные проблемы водного транспорта № 66 (1) 2021

Адрес редакции и издателя:
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, д.5

Управление научных исследований
и инновационной деятельности
© ВГУВТ, 30.03.2021