

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА
ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА»

ВЕСТНИК

**ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА
ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА**

Том 16. № 5

**Vestnik Gosudarstvennogo universiteta
morskogo i rechnogo flota
imeni admirala S. O. Makarova**

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2024

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб. : ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2024. — Т. 16. — № 5. — 162 с.

ISSN (print) 2309-5180

ISSN (online) 2500-0551

«Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова» является научным периодическим изданием, зарегистрированным Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Свидетельство о регистрации СМИ от 17 июля 2013 г. ПИ № ФС 77-54734).

В «Вестнике» публикуются материалы оригинальных научных исследований и основных результатов диссертационных работ на соискание ученой степени доктора и кандидата наук по основным группам специальностей в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников:

2.5.19 «Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства (технические науки);»

2.5.20 «Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные) (технические науки);»

2.3.3 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки);»

2.9.7 «Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография (технические науки).

Статьи тщательно отбираются по критериям новизны, актуальности, научно-практической значимости, возможности реального использования описанных в них новых технологий на водном транспорте, публикуются на русском и английском языках. Статьи рецензируются независимыми экспертами. Кроме того, в «Вестнике» публикуются обзорные материалы научных конференций, семинаров и совещаний, сообщения и статьи к юбилейным датам ведущих ученых и знаменательным событиям университета.

«Вестник» включен в Перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки РФ.

Индекс для подписки в каталоге агентства Урал-Пресс: 37276.



© Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 2024

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ	663
<i>Фирсов Ю. Г.</i> Проблемы и задачи создания нормативных документов отечественной инженерной гидрографии.....	663
<i>Царик Р. С.</i> Исследование оценки надежности крепления контейнеров с учетом фактической метацентрической высоты контейнеровоза	679
<i>Березин А. О., Сперанская Я. А., Прозоров К. В.</i> Закономерности развития экспорта зерновых культур из южных регионов России водным транспортом.....	690
<i>Кузнецов А. Л., Чистотин О. А., Затолокина М. Ю.</i> Универсальная имитационная модель потока поступления судов на морской грузовой фронт порта	700
<i>Реуцкий А. С., Буянов А. С., Буцанец А. А.</i> Сравнительный анализ способов транспортировки водорода морским транспортом по критерию удельной грузоподъемности.....	709
<i>Журавлев М. В., Гладков Г. Л., Беляков П. В.</i> Обобщение результатов натурных и лабораторных исследований гидравлических сопротивлений на изгибе русла.....	726
<i>Беспалов А. П., Каретников В. В.</i> Обзор современных технологий мониторинга судов на акваториях ВВП с использованием средств видеонаблюдения	738
ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА	749
<i>Барышников С. О., Красюк А. Б., Чистов В. Б.</i> Измерение остаточных отклонений оси корпуса судно от исходного положения	749
<i>Иванов А. Н., Матвеева Е. В.</i> Повышение надежности силовых приводов судовой и крановой техники схемно-компоновочными методами	762

Гл. редактор

С. О. Барышников
д-р техн. наук, проф.

Зам. гл. редактора

А. П. Нырков
д-р техн. наук, проф.

**Члены
редакционной
коллегии:**

А. Е. Сазонов
д-р техн. наук, проф.,
чл.-кор. РАН

Р. М. Юсупов
д-р техн. наук, проф.,
чл.-кор. РАН

О. К. Безюков,
д-р техн. наук, проф.

А. Т. Беккер,
д-р техн. наук, проф.

Н. И. Ватин,
д-р техн. наук, проф.

П. А. Гарибин,
д-р техн. наук, проф.

Д. П. Голоскоков,
д-р техн. наук, проф.

<i>В. Л. Ерофеев,</i> д-р техн. наук, проф.	<i>Мосейко Е. С., Ольховик Е. О., Рудь В. Ю.</i> Многоуровневая система обеспечения надежности судовых механических систем на этапах жизненного цикла775
<i>В. А. Жуков,</i> д-р техн. наук, доц.	
<i>Ю. М. Искандеров,</i> д-р техн. наук, проф.	СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ).....784
<i>В. В. Каретников,</i> д-р техн. наук, доц.	<i>Галиев И. Р.</i> Закономерности сжигания бедных метановоздушных смесей в поршневых двигателях784
<i>А. В. Кириченко,</i> д-р техн. наук, проф.	<i>Федоровский К. Ю., Гриненко Н. К., Чистов В. Б.</i> Эффективность интенсификации теплоотвода замкнутой системы охлаждения судовой энергоустановки.....795
<i>М. Н. Кирсанов,</i> д-р физ.-мат. наук, проф.	
<i>М. А. Колосов,</i> д-р техн. наук, проф.	АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ.....805
<i>Е. А. Королева,</i> д-р экон. наук, проф.	<i>Вознесенский Е. А., Майоров Н. Н., Терехов А. Н.</i> Разработка подпрограммы автоматизации и управления для систем зарядки мультироторных малых беспилотных авиационных систем для задач морских грузовых портов805
<i>И. И. Костылев,</i> д-р техн. наук, проф.	
<i>А. Л. Кузнецов,</i> д-р техн. наук, проф.	
<i>В. А. Логиновский,</i> д-р техн. наук, проф.	
<i>А. В. Макишанов,</i> д-р техн. наук, проф.	
<i>В. Е. Марлей,</i> д-р техн. наук, проф.	
<i>Т. А. Пантина,</i> д-р экон. наук, проф.	
<i>В. И. Решняк,</i> д-р техн. наук, проф.	
<i>А. В. Саушев,</i> д-р техн. наук, доц.	
<i>С. В. Смоленцев,</i> д-р техн. наук, проф.	
<i>С. С. Соколов,</i> д-р техн. наук, доц.	
<i>М. В. Сухотерин,</i> д-р техн. наук, доц.	
<i>А. Л. Тезиков,</i> д-р техн. наук, проф.	
<i>А. А. Чертков,</i> д-р техн. наук, доц.	
<i>В. Б. Чистов,</i> д-р техн. наук, проф.	

CONTENTS

Volume 16. № 5

2024

EDITORIAL BOARD

S. O. Baryshnikov

Doctor of Technical Sciences

Deputy Editor-in-Chief

A. P. Nyrkov

Doctor of Technical Sciences

Members

of the editorial

board:

A. Ye. Sazonov

Doctor of Technical Sciences,
Prof.,
corresponding member
of the Russian Academy
of Sciences

R. M. Yusupov

Doctor of Technical Sciences,
Prof., corresponding member
of the Russian Academy of
Sciences

O. K. Bezyukov,

Doctor of Technical Sciences

A. T. Bekker,

Doctor of Technical Sciences

N. I. Vatin,

Doctor of Technical Sciences

P. A. Garibin,

Doctor of Technical Sciences

D. P. Goloskokov,

Doctor of Technical Sciences

OPERATION OF WATER TRANSPORT, WATERWAYS AND HYDROGRAPHY.....663

Firsov Yu. G. Problems and tasks for the development of the Russian standards and requirements for engineering and design hydrographic surveying663

Tsarik R. S. Research of assessing the reliability of containers securing taking into account the actual metacentric height of the container ship.....679

Berezin A. O., Speranskaya Y. A., Prozorov K. V. Patterns of development of export cargo flows of grain crops from the southern regions of Russia.....690

Kuznetsov A. L., Chistotin O. A., Zatolokina M. J. Universal simulation model of the flow of ships to the sea cargo front of the port700

Reutskii A. S., Buyanov A. S., Butsanets A. A. Comparative analysis of methods of hydrogen transportation by sea transport based on the criterion of specific loading capacity709

Zhuravlev M. V., Gladkov G. L., Belyakov P. V. Summary of the results of field and laboratory studies of hydraulic resistance during channel bending726

Bespalov A. P., Karetnikov V. V. Review of modern technologies of vessel monitoring in the water areas of the inland waterways using video surveillance tools738

TECHNOLOGY OF SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION.....749

Baryshnikov S. O., Krasiuk A. B., Chistov V. B. Measurement of residual deviations of the ship's hull axis from the initial position.....749

Ivanov A. N., Matveeva E. V. Improving the reliability of power drives for marine and crane equipment by schematic layout methods.....762

Moseyko E. S., Ol'khovik E. O., Rud V. U. A multi-level system for ensuring the reliability of marine mechanical systems at the stages of the life cycle.....775

V. L. Erofeev,
Doctor of Technical Sciences

V. A. Zhukov,
Doctor of Technical Sciences

V. V. Karetnikov,
Doctor of Technical Sciences

A. V. Kirichenko,
Doctor of Technical Sciences

M. N. Kirsanov,
Doctor of Phys.-Math. Sciences

M. A. Kolosov,
Doctor of Technical Sciences

E. A. Koroleva,
Doctor of Economic Sciences

I. I. Kostylev,
Doctor of Technical Sciences

A. L. Kuznetsov,
Doctor of Technical Sciences

V. A. Loginovskiy,
Doctor of Technical Sciences

A. V. Makshanov,
Doctor of Technical Sciences

V. Ye. Marley,
Doctor of Technical Sciences

T. A. Pantina,
Doctor of Economic Sciences

V. I. Reshnyak,
Doctor of Technical Sciences

A. V. Saushev,
Doctor of Technical Sciences

S. V. Smolentsev,
Doctor of Technical Sciences

S. S. Sokolov,
Doctor of Technical Sciences

M. V. Sukhoterin,
Doctor of Technical Sciences

A. L. Tezikov,
Doctor of Technical Sciences

A. A. Chertkov,
Doctor of Technical Sciences

V. B. Chistov,
Doctor of Technical Sciences

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)	784
<i>Galiev I. R.</i> Patterns of lean methane-air mixtures combustion in piston engine	784
<i>Fedorovsky K. Yu., Grinenko N. K.</i> Efficiency of intensification of heat removement of a closedcircuit marine power plant cooling systems	795
AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND PRODUCTIONS	805
<i>Voznesensky E. A., Maiorov N. N., Terekhov A. N.</i> Development of automation and control software for charging systems of multirotor small unmanned aircraft systems for tasks of cargo seaports	805

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-663-678

PROBLEMS AND TASKS FOR THE DEVELOPMENT OF THE RUSSIAN STANDARDS AND REQUIREMENTS FOR ENGINEERING AND DESIGN HYDROGRAPHIC SURVEYING

Yu. G. Firsov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The current state and issues of standardization of hydrographic surveys performed for engineering purposes on inland water areas, coastal zone of the seas and continental shelf examined. There is a variety of existing regulatory documents based on outdated norms and rules of traditional analog hydrography issued more than forty years ago. There are a number of regulatory documents governing the survey of the bottom relief in order to ensure hydraulic construction, dredging, construction of structures on the continental shelf, as well as special surveys on the downstream of hydroelectric power plants that do not meet modern requirements. These documents have been updated several times in recent years, however, their content has not fundamentally changed and still remained inconsistent with modern technological capabilities of international hydrography. In the 90s of the 20th century, there was a technological breakthrough in the development of means and methods of hydrographic research, which was first reflected in the fourth edition of the S-44 Standards of the International Hydrographic Organization. The fourth edition of the S-44 Standards marked the beginning of a new era of modern digital and electronic hydrography, based on the concept of “survey orders,” due to the new capabilities of global navigation satellite systems, multibeam echo sounders and electronic hydrographic information systems. The new paradigms of digital hydrography, first introduced in the S-44 Standards, Edition 4 (1998), were developed in the 5th (2008) and 6th (2022) editions. The paper analyzed the main norms of the current regulatory documents of engineering hydrography adopted at the beginning of the 21st century: RD31.74.04–2002, SNiP 11–02–96, SP 11–104–97, SP 11–114–2004, as well as similar documents of the last decade: SP 317.1325800.2017, SP 47.13330.2016 and SP 504.1325800.2021. It is shown that all these documents are based on the conceptual provisions of analog hydrography contained in the Rules of the Hydrographic Service № 4, part 2, published by the Main Directorate of Navigation and Oceanography of the Ministry of Defense in 1984. Particular attention is paid to the criteria for assessing the survey quality (precision, accuracy and reliability) of the results of bottom topography. In particular, the assessment of the precision of the horizontal and vertical position in analog hydrography according to the Rules of the Hydrographic Service № 4, part 2, is carried out with a confidence probability of 63–68 %, while the S-44 Standards use a confidence probability of 95 %. As a result, the permissible uncertainty of the corrected depth according to the S-44 Standards is twice as high as according to the domestic rules of the hydrographic service and some current regulatory documents of engineering hydrography. It is noted that some of the current regulatory documents of engineering hydrography do not take into account the new capabilities of hydrographic hydroacoustic equipment, including multibeam echo sounders, bathymetric side scan sonars and low-frequency echo sounders for studying the bottom relief and the upper part of the bottom section for engineering and other scientific purposes. It is indicated that the new paradigm of the S-44 Standards (2022) is the introduction of the concepts of “bathymetric coverage,” “object detection” and “object search” which led to the possibility of implementing a new tool the “specification matrix” for design and formation of brief hydrographic survey characteristics, also appropriate for the engineering surveys. It is noted that the new Russian specifications for the performance of both traditional and engineering hydrographic surveys, based on the Standards of the S-44 International Hydrographic Organization, are absent, and their development, coordination and approval is urgently needed.

Keywords: design and engineering hydrographic surveying, IHO S-44 Standards, new paradigms of digital hydrography, bathymetric coverage, object detection, object search, specification matrix.

For citation:

Firsov, Yury G. “Problems and tasks for the development of the Russian standards and requirements for engineering and design hydrographic surveying.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.5 (2024): 663–678. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-663-678.

ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ СОЗДАНИЯ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ИНЖЕНЕРНОЙ ГИДРОГРАФИИ

Ю. Г. Фирсов,

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрены современное состояние и вопросы стандартизации гидрографической съемки, выполняемой в инженерных целях на внутренних водных путях, в прибрежной зоне морей и континентальном шельфе. Отмечается многообразие существующих нормативных документов, основанных на устаревших нормах и правилах традиционной аналоговой гидрографии сорокалетней давности. Обращается внимание на наличие ряда нормативных документов, регламентирующих выполнение съемки рельефа дна в целях обеспечения гидротехнического строительства, осуществления дноуглубительных работ, строительства сооружений на континентальном шельфе, а также специальные съемки на нижних бьефах гидроэлектростанций, не соответствующих современным требованиям. Данные документы за последние годы неоднократно актуализировались, однако содержание некоторых из них принципиально не менялось и по-прежнему оставалось не соответствующим современным технологическим возможностям международной гидрографии. Новые парадигмы цифровой гидрографии, впервые внесенные в Стандарты S-44 (4-я редакция (1998 г.)) получили свое развитие в 5-й (2008 г.) и 6-й (2022 г.) редакциях. В работе проанализированы основные нормы действующих нормативных документов инженерной гидрографии, принятых в начале XXI в.: РДЗ1.74.04–2002, СНиП 11–02–96, СП 11–104–97, СП 11–114–2004, а также документы последнего десятилетия: СП 317.1325800.2017, СП 47.13330.2016 и СП 504.1325800.2021. Показано, что все эти документы базируются на концептуальных положениях аналоговой гидрографии, содержащихся в Правилах Гидрографической службы № 4 (ч. 2), изданных в 1984 г. Главным Управлением навигации и океанографии Министерства обороны. Особое внимание обращается на критерии оценки качества (точности, правильности и надежности) результатов съемки рельефа дна. В частности, оценка точности планово-высотного положения в аналоговой гидрографии, согласно Правилам Гидрографической службы № 4 (ч. 2), выполняется с доверительной вероятностью 63–68 %, в то время как в Стандартах S-44 используется доверительной вероятностью 95 %. В результате требования к допустимой точности исправленной глубины, указанные в Стандартах S-44, установлены в два раза выше, чем в отечественных правилах гидрографической службы и некоторых сводах Правил для инженерной гидрографии. Отмечается, что в ряде действующих нормативных документов инженерной гидрографии не учитываются новые возможности гидроакустической аппаратуры, включая многолучевые эхолоты, батиметрические гидролокаторы бокового обзора и низкочастотные эхолоты — профилографы, предназначенные для изучения рельефа дна и верхней части разреза дна, используемые для инженерных и других научных целей. Указано, что новой парадигмой Стандартов S-44, принятых в 2022 г., является введение понятий: «батиметрическое покрытие», «обнаружение объектов» и «поиск объектов», обусловивших возможность использования такого нового инструмента для проектирования и формирования краткой характеристики съемки, в том числе инженерной, как «матрица спецификаций». Отмечается отсутствие новых российских спецификаций выполнения как традиционных, так и инженерных гидрографических съемок, основанных на базе Стандартов S-44 Международной гидрографической организации, и необходимость их срочной разработки, согласования и утверждения.

Ключевые слова: инженерная гидрография, цифровая гидрография, многолучевые эхолоты, новые парадигмы цифровой гидрографии, Свод Правил инженерных изысканий, Стандарты S-44 МГО, батиметрическое покрытие, неопределенности измерений, поиск объектов, матрица спецификаций.

Для цитирования:

Фирсов Ю. Г. Проблемы и задачи создания нормативных документов отечественной инженерной гидрографии / Ю. Г. Фирсов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 5. — С. 663–678. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-663-678.

Введение (Introduction)

В современных условиях с расширением использования ресурсов Мирового океана, прибрежных зон и внутренних водных акваторий инженерные гидрографические съемки приобретают

особое значение. Съёмка рельефа дна для последующего использования в инженерных целях служит приоритетным направлением деятельности при хозяйственном использовании акваторий и является дорогостоящим видом работ. В современных условиях съёмка рельефа дна выполняется с использованием инновационной гидроакустической аппаратуры, имеющей широкий спектр применений и возможность получения разнообразной и точной информации о дне и донных осадках. Действующие нормативные документы инженерной гидрографии не учитывают новые возможности гидроакустической аппаратуры, включая многолучевые эхолоты (МЛЭ), батиметрические гидролокаторы бокового обзора (БГБО) и низкочастотные эхолоты-профилографы (ЭП) для изучения рельефа дна и верхней части разреза дна для инженерных и других научных целей.

Текущее состояние методик использования этой гидрографической гидроакустической аппаратуры и вопросы стандартизации гидрографических съёмок, выполняемых в инженерных целях на внутренних водных акваториях, прибрежной зоне морей и на шельфе, не полностью соответствуют возможностям ее эффективного использования и возрастающим современным требованиям. Причиной этого во многом является большое количество различных нормативных документов, основанных на устаревших нормах и правилах традиционной аналоговой гидрографии сорокалетней давности. Имеется целый ряд нормативных документов, регламентирующих выполнение съёмки рельефа дна в целях обеспечения гидротехнического строительства, осуществления дноуглубительных работ, а также строительства сооружений на континентальном шельфе, не в полной мере соответствующих современным требованиям. Данные документы за последние годы неоднократно актуализировались, однако их содержание за редким исключением принципиально не изменялось, — они, как и ранее, не соответствуют современным технологическим возможностям современной цифровой гидрографии, отраженной в документах Международной гидрографической организации (МГО).

В 90-е гг. XX в. произошел технологический прорыв в развитии средств и методов гидрографических исследований, что нашло отражение в четвертой редакции Стандартов S-44 Международной гидрографической организации, основанной на понятии «категорий съёмки рельефа», обусловленной новыми возможностями глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), многолучевых эхолотов (МЛЭ) и электронных гидрографических информационных систем (ЭГИС). Новые парадигмы цифровой гидрографии, впервые внесенные в Стандарты S-44, 4-й редакции (1998 г.), получили свое развитие в 5-й (2008 г) и 6-й (2022 г) редакциях. Анализ 6-й редакции Стандартов S-44 выполнен в работе [1].

Целью работы является анализ содержания основных требований нормативных документов инженерной гидрографии, принятых в начале XXI в.: РД31.74.04–2002, СНиП 11–02–96, СП 11–104–97, СП 11–114–2004, а также новых документов, введенных в последнем десятилетии, включая СП 47.13330.2016, СП 317.1325800.2017, а также СП 504.1325800.2021. Работа выполнена на основе изучения и анализа указанных нормативных документов, а также специальной литературы, в которой рассмотрены вопросы, являющиеся предметом настоящего исследования, включая ранее опубликованные материалы автора по рассматриваемой тематике.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В настоящее время отечественная гидрография в части съёмки рельефа дна располагает следующими действующими нормативными документами:

- Правила Гидрографической службы № 4 (ПГС-4, ч. 2, изд. ГУНиО МО, 1984 г.) [2];
- Технология промерных работ при производстве дноуглубительных работ и при контроле глубин для безопасности плавания судов в морских портах и на подходах к ним» (РД 31.74.04–2002);
- Инженерно-геодезические изыскания при строительстве в виде сводов правил (СП) и сводов норм и правил (СНиП), включающих разделы: «Инженерно-гидрографические работы при инженерных изысканиях для строительства», и их актуализацию;
- Свод правил «Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений» (изд. 2004 и 2021 гг.);

– Геодезические картографические инструкции нормы и правила (ГКИНП) по съемке шельфа, изданные в период 80–90 гг. XX в.

Кроме того, имеется ряд ведомственных инструкций и руководств, обсуждение которых выходит за рамки данной статьи.

Правила Гидрографической службы [2] являются хорошо отработанным документом, на основе изучения которого сформировалось целое поколение отечественных гидрографов. В этом документе научно обоснованы такие характеристики, как подробность промера, требуемые точности определения координат и глубин, полевой контроль выполнения съемки и методы расчета окончательной точности глубин применительно к однолучевым эхолотам. Для выполнения ручной обработки промера с аналоговым однолучевым эхолотом этот документ и теперь не утратил своей актуальности. Однако в настоящее время в связи с внедрением в практику цифровых эхолотов, эхотралов, МЛЭ и ГБО, а также ГНСС и геоинформационных технологий он устарел и требует коренной переработки.

Руководящий документ «Технология промерных работ при производстве дноуглубительных работ и при контроле глубин для безопасности плавания судов в морских портах и на подходах к ним» (РД 31.74.04–2002)¹ является ведомственной инструкцией Министерства транспорта. Этот документ, введенный в действие постановлением Технического комитета Морфлот № 16 от 17.06.2004, должен «...устанавливать организационно-технические нормы, технологические способы, методы производства промера, нормативные требования по точности и срокам его выполнения при производстве дноуглубительных работ и контроле габаритов морских каналов, фарватеров и акваторий портов».

В современных условиях документ РД 31.74.04–2002 не способен в полной мере выполнить возлагаемые на него функции, поскольку в нем отсутствуют требования к точности получаемых глубин, а требуемые точности определения планового положения увязаны только с масштабами выполняемых съемок. Оценка точности, вопреки сложившейся международной гидрографической практике, основана на среднеквадратических погрешностях (СКП) с 68 % доверительной вероятности (ДВ). За основу взят предыдущий вариант документа РД 31.74.04–79, выполнена его доработка (актуализация), которой явно недостаточно.

Технологии гидрографии изменились радикально и это требует создания принципиально нового нормативного документа, который должен отражать концепции электронной гидрографии, основанные на спутниковых и геоинформационных технологиях взамен визуальных способов определения координат и ручных методов обработки материалов. В РД 31.74.04–2002 только упоминаются DGPS, RTK-спутниковые методы, но не даны указания по их применению. Основное внимание уделено визуальным методам, которые практически уже не используются. Упоминание площадной съемки рельефа носит описательный характер и не содержит конкретных рекомендаций и норм, которыми могут руководствоваться операторы гидрографических комплексов на базе МЛЭ, а такие средства, как эхотралы, ГБО и БГБО, вообще не упоминаются.

В этом документе не уделено должного внимания процедурам контроля качества выполнения промерных работ. Единственное упоминание о контроле качества сводится к требованию сличения глубин в точках пересечения основных и контрольных галсов. При этом сформулировано требование о том, чтобы в 85 % случаев сличение расхождения глубин на контрольных и основных галсах в диапазоне 0–20 м не должно превышать 5 % от глубины. Данное требование соответствует аналогичным требованиям ПГС № 4 (ч. 2) для нерасчлененного рельефа на шельфе ($\delta_{сл} = 5,1 \%$; $m_{z0} = 2,4 \%$), однако оно в 2 раза ниже аналогичных требований Стандарта S-44 для *особой категории*, что подтверждается следующими расчетами.

1. Согласно РД 31.74.04–2002, при допустимой СКП исправленной глубины в 2,4 % для глубины 10 м имеем значение 0,24 м с доверительной вероятностью 68 %.

¹ РД 31.74.04–2002. Технология промерных работ при производстве дноуглубительных работ и при контроле глубин для безопасности плавания судов в морских портах и на подходах к ним. Ростов н/Д, 2004. С. 155. <https://meganorm.ru/Data2/1/4293855/4293855087.pdf>.

2. Согласно требованиям особой категории Стандартов МГО S-44, допустимая неопределенность для глубины 10 м составляет $[(a^2 + (bd)^2)^{1/2} = (0,25^2 + (10 \cdot 0,0075)^2)^{1/2} = 0,24$ м (95 %).

Согласно требованиям USACE (EM1110–2–1003), допустимая точность исправленной глубины для категории «мягкое дно» составляет 0,30 м (95 %). Учитывая, что соотношение мер точности с доверительными вероятностями 95 и 68 % составляет $\sigma_{(95\%)} = 1,96\sigma_{(68\%)}$, можно утверждать, что требования относительно допустимой точности определения глубин, согласно Инструкции РД31.74.04–2002, в два раза ниже аналогичных требований, установленных в зарубежных Стандартах S-44 МГО [3] и Руководстве по инженерной гидрографии Корпуса военных инженеров США (USACE) [4].

Одним из главных недостатков РД31.74.04–2002 является игнорирование новейших достижений морской геоматики, а также недооценка роли современных цифровых ГБО, БГБО и функции ГБО многолучевых эхолотов. Морская электронная картография также полностью осталась за рамками этого руководящего документа. В век электронных карт одним из основных вариантов представления результатов съемки рельефа является его прямая конвертация в обменный формат S-57. Это требование является крайне актуальным для прибрежных акваторий с высокой динамикой рельефа и особенно в районах интенсивного мореплавания, а также на акваториях дноуглубления и гидротехнического строительства. Таким образом, РД31.74.04–2002 не соответствует реалиям современной электронной гидрографии, указанным в международных стандартах, и не несет в себе полезной методической и технологической информации, необходимой для гидрографов-практиков.

Гидротехническое строительство на акваториях регламентировано сводом норм и правил, в состав которых входит инженерно-геодезическое обеспечение. Среди этих документов в первую очередь следует выделить Свод норм и правил (СНиП) 11–02–96², принятый и введенный в действие с 01.11.1996, в разд. 5 «Инженерно-геодезические изыскания» которого указано, что в состав инженерно-геодезических изысканий для строительства входят в том числе «инженерно-гидрографические работы». Однако никаких норм и правил в части таких работ не приводится. Другим документом, предназначенным для нормирования инженерно-геодезического обеспечения в сфере гидротехнического строительства, является СП 11–104–97 «Инженерно-геодезические изыскания для строительства»³, который был принят и введен в действие начиная с 1.01.1998 г. В этом документе использована концепция, введенная в законе «О геодезии и картографии» (2005), о том, что гидрография является частью геодезии. Однако геодезия и современная цифровая гидрография — это дисциплины, использующие разные технологии, и измерения выполняются в различных средах: в гидрографии применяются главным образом гидроакустические измерения, достигнувшие за последние 30 лет значительного прогресса в связи с появлением МЛЭ, БГБО, ГБО, а также низкочастотных эхолотов-профилографов, а в геодезии применяются электронные тахеометры и топографические сканеры.

СП 11–104–97 одобрен Департаментом развития научно-технической политики и проектно-изыскательских работ Госстроя России (Письмо от 14.10. 1997 г. № 9–4/116) и впоследствии был актуализирован в 2004⁴, но при этом не претерпел положительных актуальных изменений. В 2018 г. был подготовлен новый Свод Правил для инженерно-геодезических изысканий для строительства

² СНиП 11–02–96. Свод Норм и Правил «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения». (Приняты и введенные в действие с 1 ноября 1996 г. постановлением Минстроя № 18–77 от 29 октября 1996 г.). М., 2005. <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294854/4294854928.pdf>.

³ СП 11–104–97. Свод Правил. «Инженерно-геодезические изыскания для строительства» (Приняты и введены в действие с 1 января 1998 г. письмом Госстроя России № 9–4/116 от 14 октября 1997 г.). М., 2005. 72 с. <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294851/4294851543.pdf>.

⁴ СП-11–104–97. Свод Правил. «Инженерно-геодезические изыскания для строительства». Ч. III: Инженерно-гидрографические работы при инженерных изысканиях для строительства / Госстрой России. М.: Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве (ФГУП «ПНИИИС») Госстроя России, 2004. 105 С. <https://dokipedia.ru/document/5166119>.

в виде документа СП 317.1325800.2017⁵. В части Инженерно-гидрографических работ (см. п. 5.5) в этом документе отмечается, что правила выполнения инженерно-гидрографических работ приведены в СП 11–104–97.

В 2012 г. СНиП 11–02–96 был актуализирован и в 2017 г. вышла новая актуализированная версия СП 47.13330.2016⁶, в которой инженерно-гидрографические работы указаны в пп. 5.4.2 в связи с «реконструкцией мостов и линейных объектов трубопроводного транспорта на участках переходов через объекты гидрографической сети». Все указанные документы напоминают, по сути, РД 31.74.04–2002, и не вносят ничего нового в вопросы проведения съемок рельефа дна с использованием новых гидрографических технологий. Разделы по правилам выполнения инженерных гидрографических работ в этих документах вызвали обоснованную критику, изложенную в публикациях [5]–[9], включая недавнее исследование [10]. Следует отметить, что в указанных документах, нет упоминания об инструкциях, нормах и правилах о проведении съемки шельфа Главного управления геодезии и картографии (ГУГК), разработанных в 80–90-е гг. XX в. В 1989 г. появилось Руководство ГКИНП 11–157–88⁷ и затем в 1993 г. был издан новый полезный нормативный документ по учету колебаний уровня: ГКИНП 11–239–92⁸.

Несколько лучше обстоит дело с нормативными документами, направленными на проведение строительных работ на шельфе. Первый документ в виде свода правил, регламентирующий проведение данных работ, был издан в 2004⁹. В нем содержится разд. 5 «Инженерно-геодезические изыскания», в котором подробно изложены вопросы позиционирования с использованием ГНСС, однако батиметрические работы представлены только на основе норм и правил промера с аналоговыми однолучевыми эхолотами (ОЛЭ), заимствованными из ПГС-4, ч. 2 [2].

В 2021 г. был подготовлен новый более современный нормативно-методический документ по проведению инженерных изысканий для строительства на континентальном шельфе СП 504.1325800.2021¹⁰. В части гидрографии этот документ содержит общие нормы и требования по применению МЛЭ, однако в нем не указаны стандарты на гидрографическую съемку МГО.

В период 2010–2013 гг. в ЗАО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт» (ГНИНГИ) был разработан новый вариант Правил гидрографической службы (ПГС-4) в двух книгах (т. 1 и 2). Проект нового ПГС был представлен гидрографической общественности в июне 2013 г. и опубликован на сайте ГНИНГИ. Однако до настоящего времени данный документ не утвержден Управлением навигации и океанографии (УНиО) в качестве нормативного. Следует отметить, что в проекте ПГС-4 (2013) впервые в отечественной практике было предложено выполнять оценку результатов гидрографических работ на уровне 95 % доверительной вероятности и использовать концепцию «категорий съемки» согласно положениям Стандартов МГО.

В условиях отсутствия современных нормативно-методических документов по съемке подводного рельефа в инженерных целях заинтересованные организации вынуждены самостоятельно

⁵ СП 317.1325800.2017. Свод Правил. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. М., 2018. <https://meganorm.ru/Data2/1/4293739/4293739236.pdf>.

⁶ СП 317.1325800.2017. Свод Правил. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. М., 2018. <https://meganorm.ru/Data2/1/4293739/4293739236.pdf>.

⁷ ГКИНП 11–157–88. Руководство по топографической съемке шельфа и внутренних водоемов. М.: ЦНИИГАиК, 1989. 280 с.

⁸ ГКИНП 11–239–92. Руководство по учету колебаний уровня при топографической съемке шельфа и внутренних водоемов. М., ЦНИИГАиК. 1993. 177 с.

⁹ СП 11–114–2004. Свод Правил. Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений. Госстрой России. — М.: ФГУП «ПНИИИС», 2004. 88 с. http://www.complexdoc.ru/ntdpdf/545826/inzhenernye_izyskaniya_na_kontinentalnom_shelfe_dlya_stroitelstva_morskikh.pdf.

¹⁰ СП 504.1325800.2021. Свод Правил. Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе. Общие требования. Издание официальное Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства. М., 2021. 168 с. https://geomlib.com/papers/Standards/rus_SP-504_2021.pdf.

разрабатывать правила выполнения данных работ применительно к решению своих узкоспециализированных задач. Примером такого решения является ГОСТ 70750–2023¹¹, в котором изложены нормы и требования выполнения таких специфических гидрографических работ, как детальная съемка рельефа дна на нижних бьефах гидроэлектростанций. При этом наряду с нормами и правилами ПГС-4 [2] рассмотрены также отдельные положения S-44 (2008) [12].

Кроме того, следует отметить текущее состояние нормативно-методического обеспечения гидрографических работ, выполняемых в целях обеспечения морских геолого-геофизических исследований, которые могут быть отнесены к инженерным гидрографическим работам, поскольку не направлены на создание государственных морских навигационных карт (ГМНК).

Навигационно-гидрографическое и геодезическое обеспечение морских геологоразведочных работ предусматривало решение ряда специальных задач, нормированных в устаревшей Инструкции ИНГГО-86¹². Новый актуализированный вариант этого документа — Инструкция¹³, была опубликована в 1998 г. В нее были включены полезные разделы по использованию ГНСС, однако раздел по нормированию батиметрической съемки с применением МЛЭ, БГБО и ГБО отсутствует.

Детальной съемке подводного рельефа при выполнении морских геолого-геофизических исследований и при эксплуатации морских ресурсов углеводородов в российской практике уделяется недостаточное внимание. Эти вопросы подробно рассмотрены в работе [13]. Зарубежный опыт свидетельствует об актуальности площадной съемки рельефа для эксплуатации морских ресурсов. Это в первую очередь отражено в Руководстве Международной организации морских подрядчиков [14], которое часто используется также российскими организациями, работающими в данной сфере морской деятельности.

Результаты (Results)

На основе выполненного анализа международных и отечественных нормативных документов, регламентирующих выполнение инженерных гидрографических работ в прибрежной зоне, можно сделать следующие выводы:

- инженерные гидрографические работы рассматриваются как составная часть инженерных геодезических работ;
- отечественные нормативные документы, касающиеся инженерных гидрографических работ не в полной мере отражают технологические возможности современной гидрографии и не соответствуют международным требованиям по точности;
- в ряде нормативных документов отсутствуют нормы и требования по использованию МЛЭ, БГБО и эхотралов;
- отсутствуют критерии качества выполнения площадной съемки рельефа дна, а точность съемки в некоторых нормативных документах допускается вдвое ниже принятой за рубежом.
- в российских нормативно-методических документах (РД, СП и СНиП), касающихся инженерных гидрографических работ, практически не обобщен опыт эксплуатации электронных гидрографических информационных систем (ЭГИС), которые широко практически используются для выполнения всех этапов гидрографических работ.

В настоящее время существует ряд государственных и частных производственных организаций, выполняющих гидрографические работы различного назначения, включая в основном инженерные гидрографические работы как на внутренних водных акваториях, так и в прибрежной

¹¹ ГОСТ Р 70750–2023. Гидроэлектростанции. Гидротехнические сооружения. Подводно-техническое обследование состояния гидротехнических сооружений и примыкающих к ним участков неукрепленного русла. Нормы и требования. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. М., Российский институт стандартизации, 2023. 56 с. <https://www.elec.ru/viewer?url=files/2023/09/04/gostr70750-2023.pdf>.

¹² Инструкция по навигационно-гидрографическому и геодезическому обеспечению морских геологоразведочных работ (ИНГГО-86). Министерство Геологии СССР. М., 1986. 104 с.

¹³ Инструкция по топографо-геодезическому и навигационному обеспечению геологоразведочных работ (утв. Министерством природных ресурсов РФ 3 декабря 1996 г.). <https://meganorm.ru/Data2/1/4293763/4293763666.htm>.

зоне морей. Практически все исполнители съемок используют современное, как правило, импортное гидрографическое оборудование и программное обеспечение в виде ЭГИС и программных пакетов окончательной обработки гидрографических данных от МЛЭ и БГБО. При этом выполняя площадную съемку с использованием ЭГИС и ее окончательную обработку, исполнители вынуждены в своих отчетах ссылаться на ПГС-4, ч. 2, в которых отсутствуют нормы и правила выполнения батиметрической съемки с МЛЭ или БГБО. Трудности возникают также и при проектировании гидрографических работ различного назначения. В частности, исполнители инженерных гидрографических работ, выполняющие площадные съемки рельефа с использованием МЛЭ, вынуждены готовить детальные технические задания, ссылаясь при этом одновременно на ПГС-4, ч. 2, и Стандарты S-44 МГО. При этом они часто указывают, что съемка выполняется в соответствии с требованиями ПГС-4, а оценка точности съемки осуществляется в соответствии со Стандартами S-44 МГО. Однако в ПГС-4 нормы и требования относятся к аналоговой гидрографии с ОЛЭ и используется концепция, основанная на принципиально различной точности определения планового положения при выполнении, соответственно, прибрежного, морского и океанского промера. С появлением ГНСС нормы точности планового положения перестали играть решающую роль, поскольку современная многочастотная фазовая аппаратура ГНСС обеспечивает абсолютную точность порядка 2–3 м (95 %) в любой точке Земного шара. Применение точных поправок, передаваемых через геостационарные ИСЗ типа «Инмарсат», повышает точность до 0,2–0,3 м, а при использовании режима кинематики реального времени (КРВ) относительная точность планового положения составляет 0,05–0,10 м (95 %).

В связи с внедрением в гидрографию мелководных МЛЭ в 90-е гг. XX в. и появлением ЭГИС возникли предпосылки для формирования новой парадигмы в изучении рельефа дна. В основу ее заложен принцип получения цифровой модели рельефа (ЦМР) дна с учетом глубины воды и актуальности акватории для обеспечения безопасности мореплавания или ее изучения в инженерном отношении с целью гидротехнического строительства и создания инфраструктуры на дне. Этот инновационный принцип, основанный на введении допустимых неопределенностей глубин для каждой категории, ознаменовал переход от аналоговой гидрографии, использующей ОЛЭ, к цифровой гидрографии на основе применения МЛЭ / БГБО и представления результатов съемки в цифровом виде. Введение новых международно-признанных стандартов современной гидрографии, основанных на S-44, требует пересмотра многих принципов, понятий и норм аналоговой гидрографии, использующей только ОЛЭ и сохранение результатов съемки рельефа дна в аналоговом виде на промерных планшетах. Кроме того, необходимо сформировать и принять новую терминологию, связанную с цифровой и электронной гидрографией, так как при подготовке технических заданий на выполнение площадной съемки рельефа дна часто возникают именно терминологические трудности в трактовке новых понятий, приведенных в Стандартах S-44 МГО.

Обсуждение (Discussion)

Последние три десятилетия отмечены беспрецедентным развитием геоинформационных технологий, в том числе технологий съемки рельефа дна. Современная морская деятельность ставит задачи получения карт рельефа дна с точностью, сопоставимой с картами рельефа суши. Имеющиеся гидрографические технологии позволяют это обеспечить. Основу этих технологий составляют высокоточное спутниковое позиционирование, гидроакустические средства площадной съемки рельефа и изучения верхней части разреза осадочной толщи, а также реализуемое в ЭГИС специализированное гидрографическое программное обеспечение [8], без которого практически невозможно проведение современных гидрографических исследований. По сути, современные гидроакустические и информационные технологии позволяют открыть новое направление в изучении морского дна, способное формировать и представлять ценную информацию для реализации инженерных проектов, а также для проведения изысканий, необходимых для морских геологов, геофизиков и экологов. Информация от современного МЛЭ, поступающая в ЭГИС, включает ба-

тиметрию (массив глубин), акустическое изображение дна (цифровая сонограмма) и акустическое изображение объектов в водной толще включая, например, донные газовые эманации [15].

Начиная с 2004 г. инженерные гидрографические работы выполнялись на основе нормативного документа СП 11–104–97¹⁴, в котором были заданы нормы по детальности и точности «промеров». Согласно этому документу промеры глубин по детальности подразделяются на *специальные, подробные и облегченные*. Каждый из видов промеров характеризуется частотой галсов и измеренных глубин на них, а также масштабом оформления плана. Средняя погрешность положения «промерных точек» должна соответствовать 1,5 мм в масштабе планшета съемки, а средняя погрешность измеренных глубин — приблизительно 1 % глубины. Термин «средняя погрешность» (m_{cp}), использованный в СП 11–104–97 (2004) связан со средней квадратической погрешностью (СКП) $m_{СКП}$ следующей формулой: $m_{СКП} = 1,25 m_{cp}$. СП 11–104–97 содержит упоминания об использовании ГНСС для определения положения глубин, однако для выполнения промеров используются только ОЛЭ.

В 2018 г. СП 11–104–97 был заменен новым документом СП 317.1325800.2017¹⁵, в котором практически полностью продублированы нормы детальности (подробности) и точности «промеров», и есть упоминания об использовании МЛЭ и ЭГИС, но правила их использования отсутствуют. В части использования МЛЭ в п. 5.5.20 этого документа отмечается следующее: «Измерения глубин выполняются эхолотами, сонарами, профилографами, механическими ручными методами (наметкой, ручными и механическими лотам, водомерной рейкой и т. п.), с применением оптических спутниковых геодезических приборов (если позволяет глубина водного объекта). Измерения глубин производятся с точностью 0,1 м при глубинах до 10 м; ±0,2 м при глубинах от 10 до 20 м и 0,5 м при глубинах свыше 20 м. При использовании многолучевых эхолотов схему проложения галсов и промерных точек требования к точности и детальности работ принимаются по документам по эксплуатации приборов и программ для сбора и обработки данных указанных эхолотов».

Следует отметить, что в документах по эксплуатации, включаемых в состав поставки МЛЭ, отсутствуют сведения о методике использования МЛЭ, правилах прокладки галсов и контроле качества площадной съемки, а в программах для сбора и обработки данных используются концепции точности, изложенные в Стандартах S-44 МГО. Кроме того, в морской гидрографии термин «промер» используется только применительно к съемке рельефа с ОЛЭ, а для съемки с МЛЭ не применяется.

Рассмотрим различия установленных норм к детальности и точности съемки подводного рельефа, установленных в новом СП 317.1325800.2017 по сравнению с S-44 МГО. Расстояния между галсами и промерными точками с учетом масштаба оформления плана следует принимать в соответствии с табл. 5.11 СП 317.1325800.2017. В качестве примера рассмотрим установленные нормы по детальности промеров глубин для наиболее строгого «специального» метода с учетом точностей глубин и их планового положения по СП 317.1325800.2017 для глубины 20 м при сложном рельефе применительно к масштабу 1: 500. Расстояние между промерными галсами составляет 5 м, расстояние между «промерными точками для рельефа дна» — 2 м.

Точность (средняя погрешность) положения «промерной точки» должна составлять ±0,75 м (68 %), а СКП положения «промерной точки» $0,75 \cdot 1,25 = 0,94$ м (68 %); точность измерения глубины (СКП): ± 0,2 м (68 %). Аналогом такой съемки, в соответствии со Стандартами S-44 МГО (ред. 4–6), является «особая категория» (глубины до 40 м), для которой неопределенность положения глубины на дне не должна превышать 2 м (95 %), а допустимая неопределенность глубины установлена ± 0,3 м (95 %). Такая съемка выполняется только с использованием средств

¹⁴ СП 11–104–97. Свод Правил. «Инженерно-геодезические изыскания для строительства». Ч. III: Инженерно-гидрографические работы при инженерных изысканиях для строительства / Госстрой России. М.: Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве (ФГУП «ПНИИИС») Госстроя России, 2004. 105 С. <https://dokipedia.ru/document/5166119>.

¹⁵ СП 317.1325800.2017. Свод Правил. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Общие правила производства работ / Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. М., 2018. <https://meganorm.ru/Data2/1/4293739/4293739236.pdf>.

площадной съемки (МЛЭ / БГБО), а для определения планового положения должна использоваться ГНСС аппаратура в режиме КРВ или в режиме приема точных поправок (PPP). На основе результатов съемки может быть построена цифровая модель рельефа (ЦМР) дна с размером ячейки регулярной сетки 0,3–0,4 м. При выполнении норм по СП 317.1325800.2017 построить такую ЦМР становится невозможно.

Проанализировав результаты сравнения норм по СП 317.1325800.2017 и S-44 можно утверждать, что в части требований точности планового положения глубин для специальной съемки по СП 317.1325800.2017, по сравнению с S-44 МГО для масштаба 1:500, они практически совпадают (СКП = 0,9 м), однако для масштаба 1:1000 и мельче требования S-44 МГО становятся более строгими. В цифровой гидрографии требования к точности планового положения не зависят от масштаба планшета, создаваемого в цифровом виде. Допустимые неопределенности глубин по S-44 и СП 317.1325800.2017 различаются практически в 2 раза. В СП 317.1325800.2017 нормируется измеренная глубина, а в S-44 — глубина, исправленная всеми поправками, точность которых оказывает решающее влияние на неопределенность глубин на карте. Анализируя более подробно данные табл. 5.1 СП 317.1325800.2017, можно утверждать, что виды «промеров» направлены в основном на использование ОЛЭ и неудобны при применении МЛЭ.

Далее остановимся на анализе СП 504.1325800.2021¹⁶, который введен впервые и, следовательно, не рассматривается в качестве актуализации СП 11–104–2004. В частности п. 4.1 свода Правил 504.1325800.2021 содержит общие требования для выполнения «...инженерных изысканий для строительства на континентальном шельфе, во внутренних морских водах, в территориальном море Российской Федерации (далее — на шельфе) и на морском побережье...». Таким образом, этот СП не распространяется на внутренние воды, такие как реки, озера, водохранилища и другие мелководные акватории, для которых в части инженерных гидрографических работ предусмотрено применение разд. 5 СП 317.1325800.2017.

В п. 5.1 СП 504.1325800.2021 содержатся общие требования к выполнению инженерно-геодезических работ, включая и инженерно-гидрографические работы на шельфе фактически для глубин до 4000 м. Континентальный шельф, согласно Федеральному закону о континентальном шельфе Российской Федерации¹⁷, простирается до подводной окраины материка, включающей географический шельф, склон, подъем и, как правило, часть абиссальной равнины, которая, согласно В-6 МГО¹⁸, лежит на глубинах 4000 м.

В п. 4.4 этого документа указано, что инженерные изыскания на шельфе в части инженерно-геодезических работ следует выполнять согласно СП 47.133330.2016 и СП 317.1325800.2017, а в 5.1.4 отмечается, что основные требования к точности и достоверности результатов приведены в указанных СП. Следует отметить, что в п. 5.1.17 СП 47.133330.2016 в части инженерно-гидрографических работ указано только требование о допустимой *средней погрешности* промерной точки (1,5 мм в масштабе планшета), а в СП 317.1325800.2017 требованиям, предъявляемым к инженерно-гидрографическим работам посвящен рассмотренный ранее п. 5.5.

В п. 5.5.20 СП 317.1325800.2017 говорится о точности *измеренных* глубин без указания меры точности (предположительно СКП). Следует обратить внимание, на то, что точность *измеренных* глубин равна $\pm 0,5$ м для глубин свыше 20 м, что, по нашему мнению, для инженерно-гидрографических работ неприемлемо. При этом инженерно-гидрографические работы на шельфе, как и ранее (см. п. 7.1.1. СП-11–104–97. Свод Правил. «Инженерно-геодезические изыскания для строительства». Ч. III.), подразделяются по аналогии с табл. 5.1 СП 317.1325800.2017. По на-

¹⁶ СП 504.1325800.2021. Свод Правил. Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе. Общие требования. Изд. офиц. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства. М., 2021. – 168 с. https://geolib.com/papers/Standards/rus_SP-504_2021.pdf.

¹⁷ Федеральный закон от 30.11.1995 г. № 187-ФЗ. О континентальном шельфе Российской Федерации. <http://www.kremlin.ru/acts/bank/8557>.

¹⁸ STANDARDIZATION OF UNDERSEA FEATURE NAMES. Bathymetric Publication No. 6 Edition 4.1.0, September 2013 <https://manualzz.com/doc/5618104/international-hydrographic-organization>.

шему мнению, при съемке рельефа на шельфе в инженерных целях с применением МЛЭ / БГБО такие требования по детальности неправомерны и затрудняют создание детальных ЦМР дна.

Согласно п. 5.1.24 СП 504.1325800.2021 погрешности (СКП) исправленных глубин не должны превышать: $\pm 0,2$ м (68 %) для глубин до 5 м; $\pm 0,3$ м (68 %) для глубин от 5 м до 30 м и 1 % (68 %) от глубины для глубин свыше 30 м. Проанализируем, как это соотносится с точностью исправленных глубин, регламентированных в Стандартах S-44 МГО. Для глубины 100 м допустимая СКП исправленной глубины составляет 1 м (68 %), которая в пересчете на неопределенность (95 %) равна 1,96 м. В соответствии с S-44 МГО допустимая неопределенность для глубины 100 м (вторая категория: $a = 1$ м, $b = 0,023[12]$) составит 2,5 м (95 %). Таким образом, для глубин более 100 м требование к допустимой неопределенности исправленной глубины в СП 504.1325800.2021 немного превосходит установленное в Стандарте S-44 МГО. Однако для меньших глубин (например, 30 м) СКП составляет $\pm 0,3$ м (68 %) или 0,59 м (95 %), в то время как, согласно S-44 МГО (особая категория: $a = 0,25$ м, $b = 0,0075 [12]$), допустимая неопределенность исправленной глубины составляет 0,34 м (95 %). Таким образом, для небольших глубин, согласно СП 504.1325800.2021, точность исправленных глубин в 2 раза ниже.

Вместе с тем следует отметить, что СП 504.1325800.2021 представляет собой полезный нормативный документ, в котором в части инженерной гидрографии впервые упоминаются такие термины, как «газовые сипы» (п. 3.1.6), «площадное обследование» (п. 3.1.17), «подводный ландшафт» (п. 1.18), «статистический анализ массива глубин» (п. 3.1.14). В этом СП впервые приведены общие требования по площадному обследованию дна с использованием «автоматизированных гидрографических комплексов» (АГК) на базе МЛЭ и многоканальных эхолотов, а также отмечается применение авиационных лазерных батиметрических систем (п. 5.1.16), приводится состав АГК на базе МЛЭ, устанавливаемых на надводных судах и необитаемых подводных аппаратах (НПА), а также приведены требования по калибровке аппаратуры АГК и необходимости выполнения контрольных галсов. Отмечается также необходимость использования гидроакустических систем подводного позиционирования (п. 5.1.17.2) при работе с НПА. По всей видимости, разд. 5 подготовлен с участием специалистов гидрографов из ООО «Фертоинг», «Сварог», «Морская геодезия», а также АО «АМИГЭ» и «МАГЭ». При этом в СП 504.1325800.2021 остается требование (п. 5.1.21), аналогичное п. 5.5.10 СП 317.1325800–2017, согласно которому «...по детальности промеры глубин подразделяют на специальные, подробные и облегченные». При использовании МЛЭ такие требования избыточны и могут затруднять создание детальных ЦМР. К сожалению, в СП 504.1325800.2021 не учтены концепции проведения гидрографических работ, отраженные в Стандартах S-44 МГО.

Современная практика выполнения инженерно-гидрографических работ, предлагаемых различными специализированными организациями [16]–[19], свидетельствует о том, что такие съемки выполняются главным образом с использованием МЛЭ на основе применения зарубежных ЭГИС и программных пакетов окончательной обработки данных площадной съемки рельефа дна, в которых предусмотрена оценка качества съемки в соответствии с критериями Стандартов S-44. При этом исполнители вынуждены ссылаться на действующие нормативные документы (например, ПГС № 4, ч. 2, СП 317.1325800.17 и др.), при этом зачастую отмечая, что «съемка выполняется с учетом международных требований».

Среди национальных и международных документов, регламентирующих нормы и правила выполнения инженерных гидрографических работ на внутренних водных акваториях и в прибрежной морской зоне, наиболее известным является Руководство USACE [4], а для работ в дальней морской зоне — Руководство по использованию МЛЭ Международной Ассоциации морских подрядчиков S-003 ИМСА [14]. Оба эти документа составлены на основе новых концепций цифровой гидрографии, впервые изложенных в четвертой редакции Стандартов S-44 (1998). Обзор указанных зарубежных нормативных документов инженерной гидрографии дан в учебном пособии «Гидрографическое обеспечение морских изысканий» (СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2017. 235 с.).

Стандарты на гидрографическую съемку МГО не являются нормативными документами, но задают общие принципы и минимальные нормы качества современной цифровой гидрографии. На основе действующих Стандартов МГО гидрографические службы разрабатывают свои нормативные документы с учетом национальных особенностей, традиций и районов съемок. В сети Интернет выложен ряд национальных Стандартов для выполнения гидрографических работ, включая [20]–[23], основанные на Стандартах МГО [12], каждый из которых имеет некоторые особенности. Следует отметить, что с выходом в свет очередной новой редакции S-44 национальные гидрографии, как правило, не спешат корректировать свои гидрографические нормативные документы.

Первоначально Стандарты МГО предполагались для использования только применительно к съемкам рельефа дна в целях обеспечения безопасности мореплавания, однако в последней (шестой) редакции Стандартов S-44 [3] предпринята попытка распространить введенные нормы и правила съемки рельефа и на инженерную гидрографию. Шестая редакция содержит ряд принципиальных нововведений, включая понятия: «батиметрическое покрытие», «обнаружение объектов» и «поиск объектов». Это обусловило возможность использования такого нового инструмента, как «матрица спецификаций» для проектирования и формирования краткой характеристики съемки, в том числе инженерной. Анализ действующих Стандартов S-44 (2022) содержится в работе [1], а также в работе [23], в которой представлен подробный разбор понятия и принципов использования «матрицы спецификаций». Практика применения концепции «матрицы спецификаций» еще должна доказать удобство и целесообразность ее реального использования для проектирования и выполнения инженерных гидрографических работ.

Необходимо отметить, что в конце XX в. инженерно-гидрографические работы были неправомерно включены в состав инженерно-геодезических работ. Этот вопрос подробно проанализирован в работах [9]–[11]. В соответствии с последней редакцией «Закона о геодезии и картографии»¹⁹ Росреестр не проводит гидрографические работы, поэтому отсутствуют правовые основания включать инженерные гидрографические работы в состав инженерных геодезических работ. За последние 15–20 лет в геодезии и гидрографии наблюдаются существенные различия в части используемых технологий. Общими остались методики плано-высотного обоснования при установке базовых станций КРВ в удаленных районах, где отсутствуют сети КРВ и высотное обоснование уровненных наблюдений. В геодезии широко используются тахеометры и топографические сканеры, а в гидрографии — главным образом МЛЭ / БГБО. Визуальные методы планового обоснования промера в виде засечек, детально рассматриваемые в некоторых действующих СП и РД, в настоящее время уже не используются. Гидрография стала цифровой и электронной, основанной на информационных технологиях в виде ЭГИС и пакетов программ окончательной обработки батиметрических данных от МЛЭ / БГБО. Применение гидрографических информационных технологий позволяет извлекать из гидроакустической информации новые сведения о морском дне, включая верхнюю часть разреза дна, а также об окружающей дно водной толще.

Концепции цифровой гидрографии отражены в действующих Стандартах S-44 (2022) МГО, которые должны стать основой для разработки отечественных ПГС нового поколения. УНиО целесообразно организовать разработку нового ПГС на основе Стандартов S-44 (2022) МГО с учетом национальных особенностей российской гидрографической школы. Перевод Стандартов S-44 (6.1.0) на русский язык выполнен в 280 ЦКП в 2024 г. и дополнен словарем новых используемых гидрографических терминов. В 2025 г. документ будет размещен на интернет-сайте УНиО.

Следует также отметить, что необходимости проведения детальной съемки подводного рельефа для эффективной эксплуатации морских ресурсов углеводородов и подготовки соответствующей нормативной документации уделяется недостаточное внимание. Эти вопросы подробно рассмотрены в работе [13], однако за десять лет, прошедших после данной публикации, они остаются нерешенными.

¹⁹ Федеральный закон. О геодезии, картографии и пространственных данных и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации. 22 декабря 2015 года. <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docview&page=1&print=1&nd=102385369&rdk=7&&empire=>

В соответствии с Постановлением Правительства России № 914 от 20.05.2022 г.²⁰ определено, что начиная с 01.09.2022 г. в обязательном перечне национальных стандартов и СП остаются только пять нормативных документов. Все остальные СП и национальные стандарты переходят в разряд добровольных. В данном Постановлении определено, что исполнитель и заказчик вправе выбирать, каким обязательным перечнем пользоваться. Перечень является добровольным только в части выбора на альтернативной основе тех нормативных документов, в соответствии с которыми будет выполняться проектирование и проведение инженерных изысканий. После включения нормативного документа в перечень документов, на основании которых выполняется проектная документация инженерных изысканий, требования данного документа становятся обязательными к исполнению. Такой подход открывает возможность выполнения инженерно-гидрографических работ с учетом современных требований, изложенных в зарубежных нормативных документах [4], [14], в условиях отсутствия новых СП для инженерной гидрографии.

Выводы (Summary)

На основе результатов выполненного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Во всех действующих СП, СНиП и РД, касающихся инженерных гидрографических работ, введенных в действие в течение последних 20 лет, включая также их новые варианты, используются устаревшие нормы и правила съемки рельефа дна, унаследованные от аналоговой гидрографии.

2. Точность положения глубин в плане неправомерно связана с масштабом съемки и по аналогии с ранее принятыми документами составляет 1,5 мм в масштабе планшета, что в современных условиях использования электронных и цифровых планшетов неправомерно. При съемке рельефа дна следует учитывать в первую очередь характер акватории, преобладающие глубины и требуемую точность положения глубины на дне

3. В рассмотренных РД и СП требуемая допустимая точность глубин основывается на погрешностях, представленных как СКП с доверительной вероятностью 63 %, в то время как требования МГО предусматривают оценки точности глубин в виде неопределенностей с доверительной вероятностью 95 %. Таким образом, в рассмотренных РД и СП (частично и СП 504.1325800–2021) требования к точности глубин в 2 раза хуже регламентированных в Стандартах МГО. Это главным образом относится к глубинам менее 40 м, которые наиболее востребованы при выполнении инженерных работ на акватории.

4. Для выполнения инженерно-гидрографических работ действуют отдельные разделы многочисленных нормативных документов и их новые версии с противоречивыми нормами и требованиями. При этом нет четких указаний о том, что вновь введенная версия СП полностью заменяет ее исходный вариант. Нужен отдельный нормативный документ, регламентирующий нормы и требования к инженерно-гидрографическим работам, основанный на действующих Стандартах МГО S-44 (2022).

5. Целесообразно поручить Министерству обороны (УНиО) разработать новые ПГС № 4 для нормирования выполнения гидрографических работ с использованием современных технологий на основе международных требований Стандартов МГО — S-44 (2022). Новый ПГС № 4 может служить основой для разработки ведомственных СП для выполнения инженерно-гидрографических работ на реках, в прибрежной зоне, а также на шельфе на глубинах до 800 м.

6. Инженерно-гидрографические работы неправомерно рассматривать в виде составной части инженерно-геодезических работ, так как измерения выполняются в разных средах, с использованием различных технологий, методических принципов и программного обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фирсов Ю. Г.* Современная цифровая гидрография и требования новых международных стандартов для батиметрической съемки / Ю. Г. Фирсов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 17–36. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-17-36.

²⁰ Постановление Правительства России № 914 от 20.05.2022 г. <http://static.government.ru/media/acts/files/1202205240002.pdf>.

2. Правила Гидрографической службы № 4, ч. 2. — ГУНиО МО СССР, 1984. — 264 С.
3. IHO Standards for Hydrographic Surveys. International Hydrographic Organization — Special Publication No 44 — 6th Edition 6.1.0, 2022. — 42 p.
4. Engineering and Design. Hydrographic Surveying. — US ACE, EM 1110-2-1003, 2013. — 315 p.
5. *Фирсов Ю. Г.* Современные технологии морских геодезических работ при нефтегазодобыче на шельфе. / Ю. Г. Фирсов, В. Н. Баландин, И. В. Меньшиков // Геодезия и картография. — 2010 — № 6. — С. 51–56.
6. *Фирсов Ю. Г.* О геодезическо-маркшейдерском обеспечении освоения месторождений углеводородного сырья на шельфе России / Ю. Г. Фирсов, С. Э. Никифоров, И. В. Меньшиков // Геодезия и картография. — 2010. — № 3. — С. 46–52.
7. *Фирсов Ю. Г.* Анализ нормативных документов отечественной инженерной гидрографии. / Ю. Г. Фирсов, И. В. Меньшиков // Геодезия и картография. — 2012. — № 4. — С. 9–11.
8. *Фирсов Ю. Г.* Основные требования к обеспечению качества современной батиметрической (топографической) съемки / Ю. Г. Фирсов // Вестник Государственного морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 3(25). — С. 171–179. DOI: 10.21821/2309-5180-2014-6-3-171-179.
9. *Чуркин О. Ф.* Инженерные изыскания для строительства. Гидрографические работы как самостоятельный вид изысканий / О. Ф. Чуркин // Геодезия и картография. — 2014. — № 5. — С. 2–7.
10. *Чуркин О. Ф.* Гидрографические работы как самостоятельный вид изысканий в строительстве. / Чуркин О. Ф. // Записки по гидрографии. — 2015. — № 5. — С. 26–33.
11. *Туктаров Р. Б.* Краткий обзор современной нормативно-методической базы проведения инженерно-гидрографических работ на водных объектах для целей гидромелиорации земель и пути ее совершенствования / Р. Б. Туктаров, А. П. Акпасов // Московский экономический журнал. — 2023. — Т. 8. — № 6. — С. 94–105. DOI 10.55186/2413046X_2023_8_6_288. — EDN NZWJBP.
12. IHO Standards for Hydrographic Surveys. S-44. — 5th Edition — Monaco: International Hydrographic Bureau, 2008. — 28 p.
13. *Горбунов О. Н.* Инженерно-гидрографические работы как основа маркшейдерского обеспечения при освоении морских ресурсов / О. Н. Горбунов // Маркшейдерский вестник. — 2011. — № 5(85). — С. 25–28. — EDN OIRIQB.
14. IMCA S-003. Guidelines for the use of Multibeam Echosounders for offshore survey. — Rev. 3. — London, UK: International Marine Contractors Association, 2024. — 60 p.
15. *Колосков Е. Н.* Применение современных гидрографических технологий для изучения рельефа и донного газопроявления в северных морях России / Е. Н. Колосков, Ю. Г. Фирсов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 54–62. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-54-62.
16. НПП «Форт XXI». Виды выполняемых работ. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://fort21.ru/vypolnyaemye-raboty?yclid=1787072943892232948> (Дата обращения: 10.04.2024).
17. ООО «АртГеоКом». Гидрографические работы. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.artgeocom.ru/geodezicheskie-raboty/gidrograficheskie-raboty> (Дата обращения: 12.04.2024).
18. ООО «ВОЛГОГРАДНИИГИПРОЗЕМ». Гидрографический раздел [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://giprozem-v.ru/uslugi/gidrograficheskie-raboty/> (Дата обращения: 28.07.2024).
19. Компания CNGS Engineering. Морские инженерные изыскания. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cngsengineering.ru/services/marine-engineering-research/> (Дата обращения: 22.08.2024).
20. Hydrographic Survey Specifications and Deliverables. — NOAA, 2021. — 154 p.
21. Canadian Hydrographic Service. Standards for hydrographic surveys. Edition 4. 2021. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/library-bibliotheque/41034685.pdf> (Дата обращения: 30.08.2024).
22. HYSPEC—Contract Specifications for Hydrographic Surveys Version 2.0. — 64 p. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.lin.govt.nz/sites/default/files/hyspec_contract-specifications-hydrographic-surveys-v2.0_20200702.pdf (Дата обращения: 12.09.2024).
23. *Зубченко Э. С.* Новая редакция Стандарта S-44 Международной гидрографической организации / Э. С. Зубченко // Навигация и гидрография. — 2021. — № 63. — С. 25–38. — EDN HUPRTX.

REFERENCES

1. Firsov, Yury G. "Modern digital hydrography and the new International Hydrographic Organization bathymetric survey Standards." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 17–36. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-17-36.
2. *Pravila Gidrograficheskoi sluzhbi № 4*, chast 2. GUNiO MO SSSR, 1984.
3. *IHO Standards for Hydrographic Surveys*. International Hydrographic Organization. Special Publication No 44, 6th Edition 6.1.0, 2022.
4. *Engineering and Design. Hydrographic Surveying*. US ACE, EM 1110-2-1003, 2013.
5. Firsov, Yu. G., Balandin V. N., Menshikov I. V. "Sovremennii tehnologii morskikh rabot pri nefregazodobichi na shelfe". *Geodesy and Cartography* 6 (2010): 51–56.
6. Firsov, Yu. G., Nikiforov S. E., Menshikov I. V. "O geodesicheskomo-marksheiderskom obespechenii osvoenia mestorojdenii uglevodorodnogo siria na shelfe Rossii". *Geodesy and Cartography* 3 (2010): 43–47.
7. Firsov, Yu. G., and I. V. Menshikov. "Specification documents analysis of the domestic engineering hydrography." *Geodesy and Cartography* 4 (2012): 46–50.
8. Firsov, Yu. G. "The main requirements for the bathymetric (topographic) surveying quality control." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(25) (2014): 171–179.
9. Churkin O. F. Injenernii iziskania dlia stroitelstva. Gidrograficheskie raboti kak samostoiatel'nyy vid isiskanii. *Geodesy and Cartography* 5 (2014): 2–7.
10. Churkin O. F. Gidrograficheskie raboti kak samostoiatel'nyy vid isiskanii v stroitelstve. *Zapiski po gidrografii* 5 (2015): 26–33.
11. Tuktarov R. B., Akpasov A. P. "Kratkii obzor sovremennoi normativno-metodicheskoi basi provedenia injenerno-uidrograficheskikh pabot na bodnih ob'ektah dlia zelei meliorazii zemel I puti ee sovershnstvovania". *Mejdunarodnii ekonomicheskii jurnal* 8.6 (2023): 94–105.
12. *IHO Standards for Hydrographic Surveys*. 5th Edition. S-44. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2008.
13. Gorbunov, O. N. "Inzhenerno-gidrograficheskie raboty kak osnova marksheiderskogo obespecheniya pri osvoenii morskikh resursov." *Marksheiderskii vestnik* 5(85) (2011): 25–28.
14. *IMCA S-003. Guidelines for the use of Multibeam Echosounders for offshore survey*. Rev.2. London, UK: International Marine Contractors Association, 2015.
15. Koloskov, E. N., and Yu. G. Firsov. "Implementation of the new hydrographic technologies for bottom topography and seafloor gas venting investigations in the Russian northern seas." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 54–62. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-54-62.
16. NPP «Fort XXI». Vidi vipolniaemih rabot. Web. 10 Apr. 2024 <<http://fort21.ru/vypolnyaemye-raboty?yclid=1787072943892232948>>.
17. ООО «ArtGeoKom». Gidrograficheskie raboti. Web. 12 Apr. 2024 <<http://www.artgeocom.ru/geodezicheskie-raboty/gidrograficheskie-raboty>>.
18. ООО «VOLGogradniiGiprozem». Gidrograficheskie razdel. Web. 28 Jul 2024 <<http://giprozem.ru/uslugi/gidrograficheskie-raboty>>.
19. Kompania CNGS Engineering. Morskie injenernie iziskania. Web. 22 Aug. 2024 <<https://cngsengineering.ru/services/marine-engineering-research/>>.
20. *Hydrographic Survey Specifications and Deliverables*. Office of Coast Survey. NOAA, 2021.
21. Canadian Hydrographic Service. Standards for hydrographic surveys. Edition 4. 2021. Web. 30 Aug. 2024 <<https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/library-bibliotheque/41034685.pdf>>.
22. HYSPEC—Contract Specifications for Hydrographic Surveys Version 2.0. Web. 12 Sep. 2024 <https://www.lin.govt.nz/sites/default/files/hyspec_contract-specifications-hydrographic-surveys-v2.0_20200702.pdf>.
23. Zubchenko, Eduard S. "Novaya redaktsiya Standarta S-44 Mezhdunarodnoi gidrograficheskoi organizatsii." *Zapiski po gidrografii* 63 (2021): 38–64.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фирсов Юрий Георгиевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: gidrograph@mail.ru, kaf_gm@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Firsov, Yury G. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: gidrograph@mail.ru, kaf_gm@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 27 сентября 2024 г.

Received: September 27, 2024.

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-679-689

RESEARCH OF ASSESSING THE RELIABILITY OF CONTAINERS SECURING TAKING INTO ACCOUNT THE ACTUAL METACENTRIC HEIGHT OF THE CONTAINER SHIP

R. S. Tsarik

Maritime State University named after admiral G. A. Nevelskoy,
Vladivostok, Russian Federation

The study focuses on the impact of the metacentric height of container ships on the reliability of container securing systems in order to prevent container loss overboard, which is a significant issue in the shipping industry. It is noted that the increase in ship capacity is achieved by increasing the number of layers of containers stacked on deck. Dynamic loads on the securing means of containers stowed in the upper tiers of container stacks are increasing, that can be particularly dangerous in the intense rolling conditions. It is noted that the international shipping community is well aware of the significance of this issue and is working to develop solutions. Assessment of the expected reliability of securing systems and prevent container loss through a comprehensive analysis of relevant factors is considered. The complexity of this assessment lies in the presence of many uncertainties in the calculation algorithm. These uncertainties are supposed to be quantified taking into account the accumulated experience and statistical data within the framework of the TopTier industry project. Existing methods and calculation algorithms do not take into account the fact that the actual height of the center of gravity of containers differs from the accepted value. The goal of this article is to study the effect of the actual metacentric height of a container ship on the parameters of rolling and the loads on containers and their securing means depending on it. To do this, using the example of a real ultra large container ship, a comparative analysis of the effect of metacentric height on the rolling acceleration was performed. The effect of the rolling acceleration on the loads acting on the deck container stack has been shown. The necessity to take into account the actual height of the center of gravity of containers is justified for the correct determination the metacentric height of the container ship and calculation loads in order to ensure the safety of operation of container ships and prevent containers from being lost overboard.

Keywords: container ship, container, stability, metacentric height, rolling, safe transportation, container loss

For citation:

Tsarik, Ruslan Stanislavovich “Research of assessing the reliability of containers securing taking into account the actual metacentric height of the container ship” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.5 (2024): 679–689. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-679-689.

УДК 656.61.052

ИССЛЕДОВАНИЕ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ КРЕПЛЕНИЯ КОНТЕЙНЕРОВ С УЧЕТОМ ФАКТИЧЕСКОЙ МЕТАЦЕНТРИЧЕСКОЙ ВЫСОТЫ КОНТЕЙНЕРОВОЗА

Р. С. Царик

ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского»,
Владивосток, Российская Федерация

Темой исследования является влияние фактической метацентрической высоты контейнеровоза на надежность средств крепления контейнеров в контексте предотвращения их потери за борт — проблемы, которая является в настоящее время одной из наиболее актуальных в отрасли. Отмечается, что рост контейнероёмкости судов во многом обеспечивается за счет увеличения количества ярусов в палубных контейнерных штабелях. Динамические нагрузки на средства крепления контейнеров, расположенных в верхних ярусах контейнерных штабелей, возрастают, что является особенно опасным в условиях интенсивной бортовой качки. Отмечается, что международное профессиональное сообщество в полной мере осознает важность и актуальность этой проблемы и разрабатывает план ее решения. Рассмотрен вопрос

оценки предполагаемой надежности систем и средств крепления контейнеров на контейнеровозах в контексте предотвращения потери контейнеров за борт. Сложность этой оценки заключается в наличии множества неопределенностей в расчетном алгоритме. Предполагается эти неопределенности квантифицировать с учетом имеющегося опыта и статистических данных в рамках отраслевого проекта TopTier. Существующие методы и расчетные алгоритмы не учитывают, что фактическая аппликата центра тяжести контейнеров отличается от расчетной. Целью настоящей работы является исследование влияния фактической метацентрической высоты контейнеровоза на параметры бортовой качки и зависящие от нее нагрузки на контейнеры и средства их крепления. Для этого на примере реального ультрабольшого контейнеровоза выполнен сравнительный анализ влияния метацентрической высоты на ускорение бортовой качки. Показано влияние ускорения бортовой качки на нагрузки, действующие на палубный контейнерный штабель. Обоснована необходимость учета фактической аппликаты центра тяжести контейнеров для корректного определения метацентрической высоты контейнеровоза и расчета нагрузок с целью обеспечения безопасности эксплуатации контейнеровозов и предотвращения потери контейнеров за борт.

Ключевые слова: контейнеровоз, контейнер, остойчивость, метацентрическая высота, бортовая качка, сохранная перевозка, потеря контейнеров.

Для цитирования:

Царик Р. С. Исследование оценки надежности крепления контейнеров с учетом фактической метацентрической высоты контейнеровоза / Р. С. Царик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 5. — С. 679–689. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-679-689.

Введение (Introduction)

Морские контейнерные перевозки имеют важнейшее значение для современной мировой экономики. Количество инцидентов в отрасли в процентном отношении крайне низкое, абсолютные значения при этом очень высоки. Крупнейшим контейнеровозом, находящимся в эксплуатации в настоящий момент, является MSC Irina и пять однотипных ему судов, принадлежащих компании Mediterranean Shipping Company (MSC). Их контейнеровместимость составляет 24346 ДФЭ (ДФЭ — двадцатифутовый эквивалент контейнеровместимости). За последние годы растущая контейнеровместимость обеспечивалась увеличением длины и ширины судна, но в большей степени — за счет увеличения количества ярусов в палубных штабелях, которая теперь достигает 11. Ограниченные глубины в важнейших акваториях не позволяют существенно увеличить осадку судов [1]. Доля палубных контейнеров достигает 60 % от общего количества контейнеров, перевозимых на судне. Типовые размеры современного крупнейшего контейнеровоза следующие: длина — 400 м, ширина — 61,5 м, осадка — 17,0 м. Рост контейнеровместимости судов опережает развитие соответствующих технологий, обеспечивающих безопасность эксплуатации контейнеровозов этого класса.

Факторы, влияющие на безопасность морских контейнерных перевозок, проанализированы в работе [2]. Планирование загрузки контейнеровозов является сложной задачей, которая до сих пор не нашла удобного и в достаточной мере эффективного решения [3]. Обеспечение безопасной перевозки контейнеров на современных крупнотоннажных контейнеровозах является наиболее значимым вызовом как для членов экипажей, так и для береговых специалистов. За период 2020—2023 гг. потери контейнеров за борт составляют около 23500 единиц, или в среднем 1470 ед. в год. Статистика аварийности за указанный период показала, что оказались за бортом в море и были потеряны более 7000 контейнеров в более чем 30 авариях¹. При этом сотни контейнеров получили повреждения, несмотря на то, что остались на борту судна. Крупнейшие потери произошли на контейнеровозах ONE Apus (1816 контейнеров) и Maersk Essen (750 контейнеров). Данная проблема требует эффективного решения несмотря на то, что в 2022 и 2023 гг. было зафиксировано существенное снижение количества потерянных за борт контейнеров (661 и 221 соответственно).

¹ Containers Lost at Sea — 2024 Update // Электрон. дан. Режим доступа URL: https://static1.squarespace.com/static/5ff6c5336c885a268148bdcc/t/6667a1b5a8b88c3efac6665e/1718067641677/Containers_Lost_at_Sea_2024_FINAL.pdf (дата обращения 05.09.2024).

Очевидно, что увеличение количества ярусов в палубных контейнерных штабелях повышает риск потери контейнеров за борт при несоблюдении требований к их размещению и креплению. Одним из основных вопросов, который предстоит решить, является соответствие действующих стандартов и правил современным реалиям и угрозам безопасности. Во многом это касается разработки надежных систем крепления контейнеров, проектирования, производства, сертификации и надлежащего использования средств крепления контейнеров [4], [5]. Оценка надежности систем крепления контейнеров является чрезвычайно важной задачей для предотвращения их потери за борт.

Масштабность и актуальность проблемы подтверждается тем, что Международная морская организация (ИМО) взяла ее решение под свой контроль. Так, на базе Морского исследовательского института Нидерландов (Maritime Research Institute Netherlands, MARIN) был запущен совместный отраслевой проект TopTier, который признан ИМО как эффективный инструмент обеспечения безопасности морской перевозки контейнеров, о чем отмечалось в повестке № 13 9-й сессии подкомитета ИМО по перевозке грузов и контейнерам². Участниками проекта TopTier являются операторы судов, судовладельцы, морские администрации государств, операторы контейнерных терминалов, производители контейнеров и средств крепления, страховые компании и различные исследовательские институты. Среди них такие лидеры отрасли, как MSC, Maersk, CMA CGM, Harpag Lloyd, ONE, Evergreen, DNV GL, ABS, Lloyd Register, CCS, ClassNK, Bureau Veritas, Korean Register, MacGregor, ABB и др. Анализ деятельности участников проекта TopTier показал, что в числе исходных данных для оценки параметров бортовой качки судна не учитывается фактическая метацентрическая высота (МЦВ) судна.

Целью настоящей работы является подтверждение необходимости учета фактической МЦВ судна для определения фактических параметров бортовой качки на этапе планирования загрузки судна и в процессе выполнения рейса. Для этого в работе проанализированы существующие методы оценки надежности средств крепления контейнеров и расчета нагрузок, действующих на контейнеры и средства крепления. В расчетные алгоритмы предлагается включить элементы, учитывающие фактическую МЦВ судна. На примере реально существующего ультрабольшого контейнеровоза выполнены расчеты, демонстрирующие влияние МЦВ на ускорение бортовой качки как одного из основных параметров, лежащих в основе расчета нагрузок, действующих на контейнеры и средства крепления.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Решение вопросов, связанных с надежностью систем и средств крепления контейнеров на судне, имеет важнейшее практическое значение для обеспечения безопасности эксплуатации контейнеровозов.

В рамках проекта TopTier осуществляется разработка способов обеспечения надежной и сохранной перевозки контейнеров на современных крупнотоннажных контейнеровозах. Для достижения этой цели решаются следующие задачи:

1. Повышение эффективности конструкций судов и контейнерного оборудования.
2. Повышение эффективности планирования размещения контейнеров на судне и их крепления.
3. Моделирование и расчет нагрузок на контейнерные штабели и средства крепления контейнеров [6], [7].
4. Повышение осведомленности членов экипажа об особенностях эксплуатации контейнеровозов в потенциально опасных условиях.

Основными причинами потери контейнеров за борт являются:

1. Ненадлежащее крепление контейнеров и дефекты средств крепления.
2. Нарушения при размещении контейнеров на судне.
3. Недостаточная квалификация членов экипажа в вопросах управления судном и недостаточная осведомленность о рисках.
4. Неблагоприятные гидрометеорологические условия плавания.

² TopTier Securing container safety // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://www.marin.nl/en/jips/top-tier> (дата обращения 05.09.2024).

Крепление контейнеров на судне должно выполняться в соответствии с Наставлением по креплению контейнеров, разработанным для судна и одобренным классификационным обществом. Однако этот документ представляет собой лишь схему крепления контейнеров, но не дает возможности рассчитать нагрузки, действующие на контейнеры и средства крепления. Для этих целей используется специальное программное обеспечение (ПО). Это ПО может базироваться на разных расчетных алгоритмах, но в их основе лежит один принцип: нагрузки, действующие на контейнер и средства крепления при самом неблагоприятном варианте, не должны превышать допустимые, установленные для контейнера и его средств крепления. В работе [8] указанный принцип описан следующим образом:

$$F_{s_i} = \Phi_i(m_j, a_k) < F_{c_i}, \quad (1)$$

где F_{s_i} — удерживающая сила каждого из средств крепления, используемого для контейнера (i — средство крепления: твистлок, крепежная штанга и т. д. [$1 < i < n$]);

F_{c_i} — максимально допустимая нагрузка на каждое из средств крепления, используемого для контейнера (i — средство крепления: твистлок, крепежная штанга и т. д.);

Φ_i — расчетный алгоритм, используемый для определения величины F_{s_i} ;

m_j — запланированное распределение масс контейнеров в соответствии с грузовым планом судна [$1 < j < m$];

a_k — ускорение каждого элемента контейнера и средства крепления, имеющих движение в процессе перевозки [$1 < k < o$].

Состояние загрузки судна и его МЦВ зависят от распределения массы контейнеров, которая находится в основе расчета динамики судна и нагрузок, действующих на контейнеры и средства крепления. Сложность этих расчетов заключается в неопределенности таких расчетных элементов, как динамика движения судна и контейнеров, исходные данные по весовым нагрузкам, алгоритм расчета нагрузок и критерии отказа. В общем виде расчетный алгоритм с учетом неопределенностей можно описать следующим образом:

$$\Phi_i(m_j + \Delta m_j, a_k + \Delta a_k) + \Delta \Phi_i(m_j + \Delta m_j, a_k + \Delta a_k) < F_{c_i} - \Delta F_{c_i}, \quad (2)$$

Чувствительность рассчитанных нагрузок к различным неопределенностям описывается путем линеаризации выражения относительно некоторого проектного (допустимого) значения, при этом влияние неопределенности входных данных на неопределенность алгоритма игнорируется:

$$\Phi_i(m_j, a_k) - F_{c_i} + \frac{\delta \Phi_i(m_j, a_k)}{\delta m_j} \Delta m_j + \frac{\delta \Phi_i(m_j, a_k)}{\delta a_k} \Delta a_k + \Delta \Phi_i(m_j, a_k) + \Delta F_{c_i} < 0. \quad (3)$$

Первые два слагаемых представляют собой идеальную цель планирования загрузки. Она может быть рассчитана таким образом, чтобы каждая нагрузка реакции крепления не превышала его критерий предельного состояния. Остальные слагаемые отражают чувствительность рассчитанных нагрузок к неопределенностям, обусловленным массой контейнеров, экстремальным ускорением, ошибками расчетного алгоритма и более низкими, чем ожидалось, значениями удерживающих сил, обеспечиваемых средствами крепления. Таким образом, надежность крепления контейнеров определяется вероятностью выполнения следующего условия:

$$P \left(\frac{\delta \Phi_i(m_j, a_k)}{\delta m_j} \Delta m_j + \frac{\delta \Phi_i(m_j, a_k)}{\delta a_k} \Delta a_k + \Delta \Phi_i(m_j, a_k) + \Delta F_{c_i} < 0 \mid \Phi_i(m_j, a_k) = F_{c_i} \right), \quad (4)$$

Важно отметить отсутствие точной информации по неопределенностям, входящим в параметры Δm_j , Δa_k , $\Delta \Phi_i$ и ΔF_{c_i} . Эти неопределенности предполагается определить и квантифицировать в рамках отраслевого проекта TopTier.

Если пренебречь неопределенностями, связанными с вводом значений масс контейнеров, то надежность средств крепления в контексте динамических нагрузок определяется вероятностью

$$P\left(\frac{\delta\Phi_i(m_j, a_k)}{\delta a_k} \Delta a_k + \Delta\Phi_i(m_j, a_k) + \Delta F_{c_i} < 0 \mid \Phi_i(m_j, a_k) = F_{c_i}\right), \quad (5)$$

Здесь определяется вероятность того, что неопределенности, вызванные ускорениями и систематическими погрешностями в алгоритме расчета нагрузок, совокупно превысят коэффициент безопасности ΔF_{c_i} в условиях, когда при планировании загрузки ставится цель использовать всю доступную вместимость судна с моделируемыми ускорениями и массами.

Планирование загрузки и расчет крепления контейнеров выполняются для допустимых динамических нагрузок («in design»). При этом принимается условие, что чрезмерных нагрузок, превышающих допустимые («off design»), удастся избежать, прежде всего при условии безопасной эксплуатации судна экипажем. Это, в том числе, предполагает оценку рисков во избежание попадания в условия чрезмерной бортовой качки судна, в особенности резонансной. Ускорение бортовой качки можно сформулировать следующим образом:

$$a_k = a_{k_{in}} + \Delta a_{k_{in}} + a_{k_{off}} + \Delta a_{k_{off}}, \quad (6)$$

где $a_{k_{in}}$ — ускорение бортовой качки в пределах установленной нормы (in design);

$\Delta a_{k_{in}}$ — неопределенность ускорения бортовой качки в пределах установленной нормы (in design);

$a_{k_{off}}$ — ускорение бортовой качки за пределами установленной нормы (off design);

$\Delta a_{k_{off}}$ — неопределенность ускорения бортовой качки за пределами установленной нормы (off design).

Ускорение бортовой качки судна, в частности, зависит от величины МЦВ. Чем больше МЦВ, тем больше ускорение бортовой качки, и, соответственно, динамические нагрузки на контейнеры и средства крепления. Результаты исследований показали, что влияние МЦВ на нагрузки, действующие на контейнерный штабель, может быть весьма значительным и привести к превышению их допустимых значений [9].

При бортовой качке контейнер и средства крепления испытывают нагрузки, варьирующие в зависимости от подъема или опускания судна на волне (вертикальная качка) и одновременного накренения на правый или левый борт. Можно выделить следующие сочетания нагрузок:

- подъем судна на волне и восходящее движение от накренения;
- подъем судна на волне и нисходящее движение от накренения;
- опускание судна на волне и восходящее движение от накренения;
- опускание судна на волне и нисходящее движение от накренения.

Графически описанные нагрузки представлены на рис. 1. Их расчет выполняется по следующим формулам, где ускорение бортовой качки a_k представлено в виде a_{roll} :

$$1. F_v = M(g \cos \theta + 0,1a_{heave} + |y_i|a_{roll}); \quad (7)$$

$$F_t = C_y M(g \sin \theta + (z_i - Z_{rc})a_{roll}). \quad (8)$$

$$2. F_v = M(g \cos \theta + 0,1a_{heave} - |y_i|a_{roll}); \quad (9)$$

$$F_t = C_y M(g \sin \theta + (z_i - Z_{rc})a_{roll}). \quad (10)$$

$$3. F_v = M(g \cos \theta - 0,1a_{heave} + |y_i|a_{roll}); \quad (11)$$

$$F_t = C_y M(g \sin \theta + (z_i - Z_{rc})a_{roll}). \quad (12)$$

$$4. F_v = M(g \cos \theta - 0,1a_{heave} - |y_i|a_{roll}); \quad (13)$$

$$F_t = C_y M(g \sin \theta + (z_i - Z_{rc})a_{roll}), \quad (14)$$

где z_i — аппликата ЦТ контейнера;

z_{rc} — вертикальное расстояние от днища судна до центра вращения бортовой качки судна (принимает большее значение из следующих: $z_{rc} = 0,5(D/2 + d)$ или $z_{rc} = D/2$;

C_y — коэффициент, учитывающий ускорение носовой оконечности судна при рыскании, $C_y = 1 + (x_i - 0,75L_{pp}) / L_{pp}$ при $x_i \geq 0,75L_{pp}$; $C_y = 1$ при $x_i < 0,75L_{pp}$.

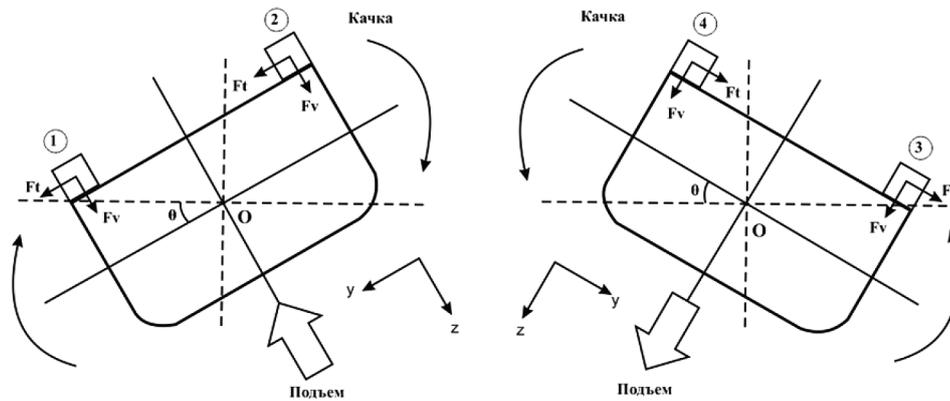


Рис. 1. Распределение основных нагрузок на палубный контейнерный штабель при бортовой качке

Ускорение бортовой качки судна a_{roll} определяется по формуле

$$a_{roll} = \theta \left(\frac{2\pi}{T_\theta} \right)^2, \quad (15)$$

где a_{roll} — ускорение в центре тяжести судна от бортовой качки, рад/с²;

θ — угол крена, рад;

T_θ — период бортовой качки, с.

Период бортовой качки рассчитывается по формуле

$$T_\theta = 1,1 \frac{2K_{xx}}{\sqrt{GM}}, \quad (16)$$

где T_θ — период бортовой качки, с;

K_{xx} — радиус инерции массы судна при бортовой качке, м ($K_{xx} = 0,35B$, где B — ширина судна, м);

GM — МЦВ судна, м.

Угол крена θ рассчитывается по формуле

$$\theta = \frac{2,81C}{T_E \sqrt{B}} \sqrt{\frac{L_0}{L_{pp}} + \frac{gT_E^2}{2\pi L_{pp}} - \frac{125}{L_{pp}}}, \quad (17)$$

где θ — угол крена, рад (значение θ принимается в интервале от 20 до 30 град.);

C — коэффициент, учитывающий высоту волнения:

$C = 10,75 - ((300 - L_{pp}) / 100)^{1,5}$ при $L_{pp} \leq 300$ м;

$C = 10,75$ при 300 м $< L_{pp} \leq 350$ м;

$C = 10,75 - ((L_{pp} - 350) / 150)^{1,5}$ при $L_{pp} > 350$ м;

L_0 — длина судна, определяемая при максимальной осадке от форштевня до осевой линии баллера руля, м (при $L_0 < 10$ м L_0 принимается равной 110 м);

L_{pp} — длина судна между перпендикулярами, м;

g — ускорение свободного падения, м/с²;

T_E — период набегания волн на судно, с;

$$\text{при } T_0 > 1,1 \frac{2\pi}{g} V \quad T_E = 0,5 \left(T_0 + \sqrt{T_0^2 - \frac{2\pi}{g} VT_0} \right);$$

$$\text{при } T_0 \leq 1,1 \frac{2\pi}{g} V \quad T_E = T_0;$$

V — скорость судна, уз.

Формулы (15) и (16) демонстрируют очевидную зависимость ускорения бортовой качки от МЦВ судна (GM). Исследования, выполненные в работах [10], [11], показали, что аппликата фактического центра тяжести контейнеров может отличаться от нормированной на несколько десятков сантиметров. Это, в свою очередь, приводит к тому, что фактическая МЦВ судна также может отличаться от расчетной на несколько десятков сантиметров.

Незнание экипажем фактической МЦВ судна представляет собой дополнительную неопределенность при расчетах ускорения бортовой качки и нагрузок на контейнеры и средства крепления. Эта неопределенность должна учитываться при расчетах ускорения бортовой качки по выражению (6). Тогда выражение (6) может быть записано в следующем виде:

$$a_k = a_{k_{in}} + \Delta a_{k_{in}} + a_{k_{off}} + \Delta a_{k_{off}} + \Delta a_{k_{GM}}, \quad (18)$$

где $\Delta a_{k_{GM}}$ — неопределенность ускорения бортовой качки, обусловленная значением фактической МЦВ, которое неизвестно.

Знание экипажем значения фактической МЦВ означает, что неопределенность $\Delta a_{k_{GM}}$ может быть принята равной нулю, а итоговое значение ускорения бортовой качки a_k может быть определено более точно, что, в свою очередь, позволит более точно определить нагрузки, которые будут действовать на контейнеры и средства крепления в течение рейса.

Результаты (Results)

В настоящей работе исследования проводились на примере ультрабольшого контейнеровоза, основные характеристики которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики модельного контейнеровоза

Валовая вместимость	210 678
Дедвейт	197 059 т
Водоизмещение по летнюю марку	254 516 т
Длина наибольшая	399,86 м
Длина между перпендикулярами	383,00 м
Ширина	58,8 м
Летняя осадка	16,025 м
Эксплуатационная скорость	22,5 уз
Максимальная контейнеровместимость	20 170 ДФЭ

Приняв условное увеличение МЦВ судна на 0,2 м, обусловленное тем, что фактическая аппликата ЦТ контейнеров на некоторую величину ниже, чем расчетная, была выполнена оценка увеличения ускорения бортовой качки a_{roll} для разных углов крена в диапазоне 1–30 град. Это увеличение a_{roll} по своей сути и является $\Delta a_{k_{GM}}$, включенной в формулу (6) для учета неопределенности ускорения бортовой качки, обусловленной значением фактической МЦВ, которое неизвестно. Расчетные МЦВ были рассмотрены в диапазоне 1,5–10,0 м, что в достаточной мере охватывает возможные значения МЦВ для большинства случаев загрузки модельного судна. Для начального и каждого последующего, значения МЦВ, кратного 1 м, были добавлены 0,2 м и затем выполнено сравнение полученных результатов.

Графически результаты увеличения a_{roll} на примере пары значений МЦВ 3,0 и 3,2 м представлены на рис. 3. Установлено, что для любых значений МЦВ в рассматриваемом диапазоне абсолютное увеличение a_{roll} носит линейный характер. При этом увеличение a_{roll} для выбранной пары значений МЦВ, очевидно, растет с увеличением угла крена (θ). Для некоторых значений МЦВ и θ значение a_{roll} приведено в табл. 2.

Вместе с тем следует отметить, что динамика увеличения a_{roll} снижается с увеличением МЦВ для того же угла крена. Например, при увеличении МЦВ с 1,5 м до 1,7 м a_{roll} при угле крена 20° увеличится с 0,577 до 0,656 ($\Delta a_{kGM} = 0,079$) рад/с², а при увеличении МЦВ с 10,0 м до 10,2 м a_{roll} увеличится с 3,861 до 3,916 ($\Delta a_{kGM} = 0,055$) рад/с².

Таблица 2

Значение a_{roll} в зависимости от угла крена и МЦВ

θ , град	МЦВ, м									
	1,5	1,7	3,0	3,2	5,0	5,2	7,0	7,2	10,0	10,2
5	0,144	0,164	0,290	0,308	0,484	0,498	0,675	0,691	0,965	0,979
10	0,288	0,328	0,580	0,617	0,968	0,997	1,350	1,382	1,931	1,958
15	0,433	0,492	0,869	0,925	1,451	1,495	2,025	2,073	2,896	2,937
20	0,577	0,656	1,159	1,234	1,935	1,994	2,700	2,764	3,861	3,916
25	0,721	0,820	1,449	1,542	2,419	2,492	3,375	3,456	4,826	4,895
30	0,865	0,984	1,739	1,850	2,903	2,991	4,050	4,147	5,792	5,874

Графически изменение a_{roll} в зависимости от МЦВ на примере значений 3,0 и 3,2 м показано на рис. 2.

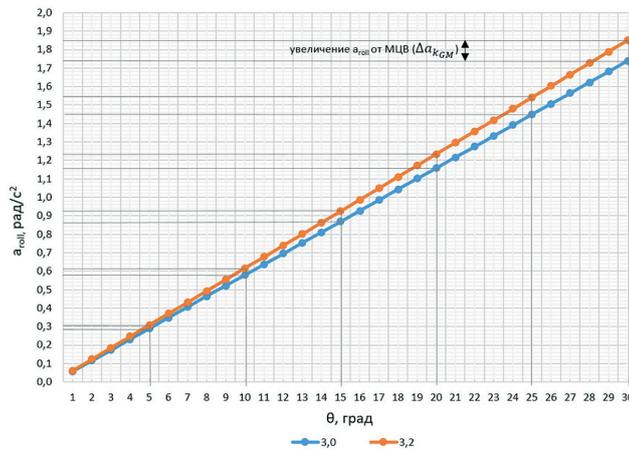


Рис. 2. Увеличение a_{roll} при разных углах крена для МЦВ 3,0 м и 3,2 м

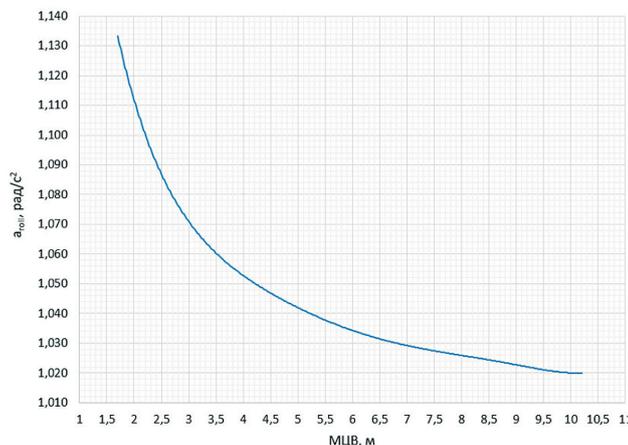


Рис. 3. Динамика относительного изменения a_{roll} в зависимости от МЦВ

Относительное изменение a_{roll} определялось как отношение его значений при МЦВ, увеличенной на 0,2 м, и ее исходным значением. Например, для $\theta = 20^\circ$ при МЦВ 3,0 и 3,2 м $a_{roll} = 1,159$ и 1,234 рад/с² соответственно (см. табл. 2), а отношение этих величин равно 1,067 (рис. 3) и оно отношение не изменяется в зависимости от угла крена θ при тех же значениях МЦВ.

Заключение (Conclusion)

Разработка надежных систем и средств крепления контейнеров является важнейшей задачей, актуальность которой растет с учетом увеличения рисков потери контейнеров за борт при эксплуатации современных крупнотоннажных контейнеровозов. Решение данной задачи осложняется наличием большого числа неопределенностей, которые необходимо учитывать при расчетах. Квантификация этих неопределенностей может быть выполнена на основе практического опыта эксплуатации флота и имеющихся статистических данных.

Фактические параметры бортовой качки судна, обусловленные разницей между расчетной аппликацией центра тяжести контейнеров и ее фактическим значением, а также соответствующим изменением МЦВ, либо совсем не учитываются, либо учитываются недостаточно. Расчетные алгоритмы, применяемые для оценки надежности систем крепления контейнеров, среди прочих неопределенностей не учитывают, что фактическая МЦВ контейнеровоза, по сути, остается неизвестной, поскольку в ее расчетах используется стандартное, а не фактическое значение аппликаты центра тяжести контейнеров. Поэтому полученные таким образом результаты расчетов нельзя считать объективными.

Выполненные в настоящей работе исследования подтверждают необходимость учета в расчетных алгоритмах фактической метацентрической высоты контейнеровоза для оценки надежности средств крепления контейнеров с целью их сохранной перевозки и обеспечения безопасной эксплуатации контейнеровозов в целом. Это делает необходимым определение и учет фактической аппликаты центра тяжести контейнеров на этапе планирования загрузки судна.

Дальнейшие исследования этой проблемы могут быть направлены на разработку эффективных расчетных алгоритмов, позволяющих определять надежность систем крепления контейнеров с учетом использования различных средств крепления, в том числе имеющих разные эксплуатационные и прочностные характеристики. Целесообразно, чтобы результаты исследований этого вопроса были учтены в нормативных документах, направленных на обеспечение безопасной эксплуатации судов-контейнеровозов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Якута И. В. Исследование влияния изменения отношений главных размерений на мореходные качества контейнеровозов / И. В. Якута // Известия КГТУ. — 2023. — № 68. — С. 110–124. DOI: 10.46845/1997-3071-2023-68-110-124. — EDN QHACIU.
2. Акмайкин Д. А. Анализ факторов, влияющих на безопасность морских контейнерных перевозок / Д. А. Акмайкин, Р. С. Царик, А. Д. Москаленко [и др.] // Транспортное дело России. — 2015. — № 6. — С. 207–210. — EDN VLMVKT.
3. Кузнецов А. Л. Распределение контейнеров по «бязм» при составлении грузового плана контейнеровоза / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Д. Семенов, А. М. Сампиев // Морские интеллектуальные технологии. — 2023. — № 1–1(59). — С. 219–223. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.028. — EDN AHYKAT.
4. Radisic Z. Necessity of proper lashing of containers on the ship's deck as part of optimization of the sea voyage / Z. Radisic // Promet-traffic & transportation. — 2004. — Vol. 16. — Is. 2. — 97–104. DOI: 10.7307/ptt.v16i2.580.
5. Yulianto T. Strength analysis of a container lashing on the container ship by using finite element method / T. Yulianto, S. H. Sujatanti и др. // Department of naval architecture, Faculty of maritime technology, Sepuluh Nopember Institute of Technology, Surabaya, Indonesia. — 2018. — Pp. 6–7. DOI: 10.5220/0008375401010105.
6. Fukasawa T. Numerical simulation of the behavior of multi high container stack and the consideration on the container securing system, 1 st Report: Rigid-body modeling / T. Fukasawa, N. Ohtsuki, K. Uenishi // Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers. — 2006. — Vol. 4 — Pp. 213–220. DOI: 10.2534/jjasnaoe.4.213.

7. Li C. Dynamic investigation of a seven-tier container stack with different lashing arrangements subject to rolling and pitching excitation / C. Li, Z. Cai, D. Wang // *Ships and Offshore Structures*. — 2022. — Vol. 17. — Is. 7. Pp. 1581–1591. DOI: 10.1080/17445302.2021.1937792.

8. Konning J. TopTier, seakeeping and container cargo securing safety / J. Konning, R. Green, W. Pauw // *Proceedings of the 18th International Ship Stability Workshop*. — 2022. — Pp. 259–264.

9. Царик Р. С. Оценка влияния аппликаты центра тяжести контейнера на нагрузки палубного контейнерного штабеля / Р. С. Царик // *Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адм. С. О. Макарова*. — 2021. — Т. 13. — № 2. — С. 207–221. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-207-221. — EDN FVUURC.

10. Царик Р. С. Оценка влияния положения центра тяжести контейнера на метацентрическую высоту контейнеровоза / Р. С. Царик, Д. А. Акмайкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2016. — № 6 (40). — С. 58–70. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-58-70. — EDN XHLRIN.

11. Царик Р. С. Оценка влияния стандартного и фактического центров тяжести контейнера с типовым размещением груза на метацентрическую высоту контейнеровоза / Р. С. Царик // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2021. — Т. 13. — № 1. — С. 17–28. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-17-28. — EDN GNVQGL.

REFERENCES

1. Yakuta, Irina V. “Study of the effect of changing the ratio of main dimensions on the seaworthiness of container ships” *Vestnik of Kaliningrad State Technical University* 68 (2023): 110–124. DOI 10.46845/1997-3071-2023-68-110-124.

2. Akmaykin, Denis A. “Analysis of factors affecting the safety of container shipping” / D. A. Akmaykin, R. S. Tsarik, A. D. Moskalenko et al. // *Transportnoe delo Rossii* 6 (2015): 207–210.

3. Kuznetsov, Aleksandr L. The algorithm of container grouping for the bayplan creation purposes / A. L. Kuznetsov, A. V. Kirichenko, A. D. Semenov, A. M. Sampiev // *Marine intellectual technologies* 1.1 (2023): 219–223. DOI 10.37220/MIT.2023.59.1.028.

4. Radisic Z. “Necessity of proper lashing of containers on the ship’s deck as part of optimization of the sea voyage.” *Promet-Traffic&Transportation* 16.2 (2004): 97–104. DOI: 10.7307/ptt.v16i2.580.

5. Yulianto T., S. H. Sujatanti et. al. “Strength analysis of a container lashing on the container ship by using finite element method” *Department of naval architecture, Faculty of maritime technology, Sepuluh Nopember Institute of Technology, Surabaya, Indonesia*. (2018): 6–7. DOI: 10.5220/0008375401010105.

6. Fukasawa, Toichi, Nobuya Ohtsuki, and Kiyohito Uenishi. “Numerical simulation of the behavior of multi high container stack and the consideration on the container securing system- 1 super (st) Report: Rigid-body modeling.” *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers* 4 (2006): 213–220. DOI: 10.2534/jjasnaoe.4.213.

7. Li, Chuntong, Zhonghua Cai, and Deyu Wang. “Dynamic investigation of a seven-tier container stack with different lashing arrangements subject to rolling and pitching excitation.” *Ships and Offshore Structures* 17.7 (2022): 1581–1591. DOI: 10.1080/17445302.2021.1937792.

8. Koning, J., R. Grin, and W. Pauw. “TopTier, seakeeping and container cargo securing safety.” *Proceedings of the 18th international ship stability workshop* (2022):259–264.

9. Tsarik, Ruslan S. “Evaluation of container center of gravity height influence on deck container stack loads” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.2 (2021): 207–221. DOI 10.21821/2309-5180-2021-13-2-207-221.

10. Tsarik, Ruslan S. and D. A. Akmaykin Evaluation of influence of container’s center of gravity position on container ship’s metacentric height *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 6(40) (2016): 58–70. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-58-70.

11. Tsarik, Ruslan S. “Evaluating the influence of the standard and actual centers of gravity of the typically loaded container on the metacentric height of a container ship” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.1 (2021): 17–28. DOI 10.21821/2309-5180-2021-13-1-17-28.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Царик Руслан Станиславович —
капитан, кандидат технических наук.
ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского»
690003, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Верхнепортовая, д. 50а
e-mail: tsarik@msun.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Tsarik, Ruslan Stanislavovich —
Master mariner, PhD
Maritime State University
named after admiral G. I. Nevelskoi
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: tsarik@msun.ru

*Статья поступила в редакцию 10 сентября 2024 г.
Received: September 10, 2024.*

PATTERNS OF DEVELOPMENT OF EXPORT CARGO FLOWS OF GRAIN CROPS FROM THE SOUTHERN REGIONS OF RUSSIA

A. O. Berezin¹, Y. A. Speranskaya², K. V. Prozorov²

¹ — Russian Maritime Register of Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

² — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The topic of the study is to identify patterns of development of export cargo flows of grain crops from the southern regions of the Russian Federation. The analysis of the volumes of grain shipments from the ports of the Azov-Black Sea and Caspian basins separately was carried out. The main consumers and importers of Russian grain are highlighted, as well as the main directions in the transportation of grain cargoes from the southern regions of Russia. Various standard sizes of bags involved in the transportation of this category of goods are considered, as well as the reasons for their use in the export of Russian grain from the ports of the Caspian Sea and the Black Sea-Azov basin. The main types of grain crops to be exported from the southern regions of the Russian Federation are noted, including their shares of the total volume of all transported grain. The dynamics of changes in the volume of transportation of individual grain crops from the ports of the Black Sea-Azov basin and the Caspian Sea, respectively, is presented. The trend towards a stable annual increase in export cargo flows of Russian grain is analyzed. The seasonality in the export of the studied category of goods is considered, annual temporary peaks in the curves of cargo flows corresponding to a sharp increase in the volume of grain shipments are highlighted. The presence of patterns in the behavior of the curves of grain export cargo flows from the southern regions of Russia is noted, manifested in the similarity of the shapes of the curves of transportation volumes over various years, as well as in their desire to approach the average curve of cargo flows calculated for the entire analyzed period. The question was raised about the possibility of taking into account the trends under consideration when forecasting changes in the volume of grain export shipments from the ports of the Black Sea-Azov and Caspian basins.

Keywords: grain export, Black Sea-Azov basin, Caspian Sea.

For citation:

Berezin, Aleksey O., Speranskaya, Yana A., and Prozorov, Kirill V.. "Patterns of development of export cargo flows of grain crops from the southern regions of Russia." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.5 (2024): 690–699. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-690-699.

УДК 656.6

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ЭКСПОРТА ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР ИЗ ЮЖНЫХ РЕГИОНОВ РОССИИ ВОДНЫМ ТРАНСПОРТОМ

А. О. Березин¹, Я. А. Сперанская², К. В. Прозоров²

¹ — ФАУ «Российский морской регистр судоходства»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Темой исследования является выявление закономерностей развития экспортных грузопотоков зерновых культур из южных регионов Российской Федерации. Проведен анализ объемов перевозок зерна из портов Азово-Черноморского и Каспийского бассейнов в отдельности. Выделены главные потребители и импортеры российского зерна, а также основные направления в перевозках зерновых грузов из южных регионов России. Рассмотрены различные типоразмеры судов, привлекаемые к транспортировке рассматриваемой категории грузов, а также причины их использования при экспорте российского зерна из портов Каспия и Черноморско-Азовского бассейна. Отмечены основные виды зерновых культур, подлежащие экспорту из южных регионов Российской Федерации, в том числе определена их доля от общего объема всего перевозимого зерна. Представлена динамика изменения объемов перевозок отдельных зерновых культур из портов

Азово-Черноморского бассейна и Каспийского моря соответственно. Проанализирована тенденция к стабильному ежегодному приросту экспортных грузопотоков российского зерна. Рассмотрена сезонность в экспорте исследуемой категории грузов, выделены ежегодные временные пики в кривых грузопотоков, соответствующие резкому увеличению объемов перевозок зерновых культур. Отмечено наличие закономерностей в поведении кривых экспортных грузопотоков зерна из южных регионов России, проявляющееся в схожести форм кривых объемов перевозок в различные годы, а также в их стремлении приблизиться по своим параметрам к средней кривой грузопотоков, рассчитанной за весь анализируемый период. Предложен к обсуждению вопрос о возможности учета рассматриваемых тенденций при прогнозировании изменения объемов экспортных перевозок зерновых культур из портов Азово-Черноморского и Каспийского бассейнов.

Ключевые слова: экспорт зерна, Азово-Черноморский бассейн, Каспийское море.

Для цитирования:

Березин А. О. Закономерности развития экспорта зерновых культур из южных регионов России водным транспортом / А. О. Березин, Я. А. Сперанская, К. В. Прозоров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 5. — С. 690–699. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-690-699.

Введение (Introduction)

Мировая торговля обусловлена международным разделением труда. Отдельные государства не могут по объективным причинам обеспечивать себя всем необходимым самостоятельно и, соответственно, закупают и продают отдельные виды продукции. Попытки обеспечивать себя всем необходимым самостоятельно экономически неэффективны [1], [2]. Все это в полной мере относится и к торговле продовольственными товарами. Лишь страны, расположенные в благоприятных климатических зонах, занимаются производством сырья для продовольственной промышленности, которое при этом перерабатывается и потребляется совсем в иных государствах, но часть готовой продукции может возвращаться в страну происхождения сырья. Регионы производства и потребления, как правило, разделены водными пространствами, что приводит к крупным перевозкам продовольствия водным транспортом [3]. Таким образом, рынок транспортировки массовых продовольственных грузов объективно существует и постоянно увеличивается [4]. При этом спрос на продовольственные товары постоянно растет, и его общее предложение уже не соответствует потребностям населения планеты, в связи с чем возникает общий дефицит продовольствия на планете. По данным ООН, число людей, нуждающихся в продовольствии, составляет около 70 млн чел. В мире объективно возникают точки избытка и недостатка продовольствия, поэтому морские перевозки продовольственных товаров характеризуются несбалансированностью.

Основу продовольственного рынка составляют сельскохозяйственные товары. Данный сектор рынка оказывает непосредственное влияние на обеспечение продовольственной безопасности ряда стран, поддерживая их экономическую стабильность. Основным элементом рынка сельскохозяйственных товаров являются зерновые культуры (пшеница, кукуруза, ячмень, соя и др.), которые занимают долю, примерно равную 40 % от общего объема мирового рынка массовых сухих грузов [5].

Данное исследование, направленное на выявление основных закономерностей развития рынка экспортных перевозок зерновых грузов водным транспортом в Черноморско-Азовском и Каспийском бассейнах [6], имеет целью выявление системы функциональных зависимостей, которые определяют частную модель функционирования рынка зерновых.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Зерновой сектор составляет основу агропромышленного комплекса Российской Федерации, тем самым делая ее одним из крупнейших мировых производителей и экспортеров зерновых культур, что подтверждается предварительными данными Министерства сельского хозяйства Российской Федерации, в соответствии с которыми в 2023–2024 гг. наша страна заняла первое место в мире по экспорту пшеницы и ячменя, а также стабильно удерживает лидерские позиции в мировом рейтинге государств-экспортеров иных видов зерновых культур.

К традиционным импортерам российского зерна относятся страны Ближнего Востока и Африки, а также некоторые страны Средиземноморья. С учетом существующей в настоящее время геополитической обстановки география поставок зерновых культур значительно изменилась, она расширилась и охватила такие страны, как Китай, Индию, Бангладеш, Индонезия, Пакистан, страны Южной Америки и др.

Основная часть экспортных грузопотоков зерна из Российской Федерации осуществляется через морские и речные порты Черноморско-Азовского бассейна, а также порты Каспийского моря в связи с их близостью к местам производства зерновых культур. Следует отметить, что через порты Каспийского моря, где количество маршрутов транспортировки весьма ограничено, экспортируются значительно меньшие объемы зерновых, чем через порты Черноморско-Азовского бассейна [7], [8], [12].

В качестве основных направлений экспортных перевозок зерновых культур из портов Черноморско-Азовского бассейна можно выделить следующие [9]:

- Новороссийск – Египет;
- Новороссийск – Турция;
- Новороссийск – Бангладеш;
- Новороссийск – Западная Африка;
- Новороссийск – Южная Америка;
- Ростов-на-Дону – Турция;
- Ростов-на-Дону – Северная Африка / Египет;
- Туапсе – Египет;
- Туапсе – Бангладеш;
- ОПЛ Кавказ – Египет;
- ОПЛ Кавказ – Китай;
- ОПЛ Кавказ – Западная Африка;
- ОПЛ Кавказ – Южная Америка.

Основные направления перевозок зерновых культур из портов Каспийского моря:

- Астрахань – северные порты Ирана;
- Махачкала – северные порты Ирана.

Для перевозок зерновых культур из портов Черноморско-Азовского бассейна используют различные типоразмеры судов: Supramax (45–55 тыс. т), Handysize (20–35 тыс. т) и суда грузоподъемностью до 10 тыс. т (Coaster). Известно, что увеличение грузоподъемности судов при перевозке массовых грузов, к которым относятся зерновые, приводит к снижению себестоимости перевозки и, следовательно, увеличению экономической эффективности использования крупных судов. Вместе с тем ограничения по осадкам позволяют принимать суда размеров Handymax и Handysize только в портах Кавказ (до 25–28 м), Тамань (до 18,5 м), Новороссийск (до 13 м) и Туапсе (до 12 м). Все остальные южные порты России (морские и речные) работают исключительно с судами небольших размеров. Именно поэтому суда размеров Panamax, Supramax, Handymax и Handysize используются при перевозках на значительные расстояния (в страны западной Африки, Южной Америки, Китай, Индию, Пакистан и др.) больших партий зерна, контракты на которые заключаются лишь периодически и, как правило, в данном случае в качестве покупателя выступает государство. Суда типа Coaster являются наиболее эффективными при транспортировке зерновых грузов на незначительное расстояние (страны Средиземноморья, Ближнего Востока, северной Африки и др.) и небольшими партиями (3–5 тыс. т), когда покупателем является юридическое лицо.

Перевозки зерновых культур из российских портов Каспийского моря (Астрахань и Махачкала) осуществляют исключительно суда типа Coaster ввиду отсутствия здесь потребности в перевозках крупных партий груза, а также учитывая незначительное плечо перевозки. Организационные трудности в оплате перевозок в этом регионе также оказывают значительное влияние на эффективный и целесообразный размер партии перевозимого груза. Фрахтовый рынок на Каспии является существенно более волатильным, чем в Черноморско-Азовском бассейне.

Обсуждение (Discussion)

Номенклатура зерновых культур, экспортируемых из южных портов России, весьма разнообразна, она включает десятки видов зерна: пшеницу различных сортов (мукомольную, твердых сортов, кормовую, мягкую и т. д.), ячмень, кукурузу, нут, сою, горох, рис и иные виды. Основные доли в общем объеме экспортируемого зерна из портов Черноморско-Азовского бассейна составляют: мукомольная пшеница (около 61 %), ячмень (9 %) и кукуруза (6 %). Доли остальных видов зерновых в отдельности несоизмеримо малы с объемами перевозок указанных ранее культур, поэтому целесообразно объединить их в отдельную группу, на которую приходится оставшиеся 24 % грузооборота.

Анализ данных динамики изменения грузопотоков зерновых грузов [10], [16] в период с 2015–2021 гг. позволил сделать вывод о наличии постоянной тенденции к повышению общих объемов рассматриваемых перевозок. Подобное утверждение справедливо как для Черноморско-Азовского, так и для Каспийского бассейна (рис. 1).

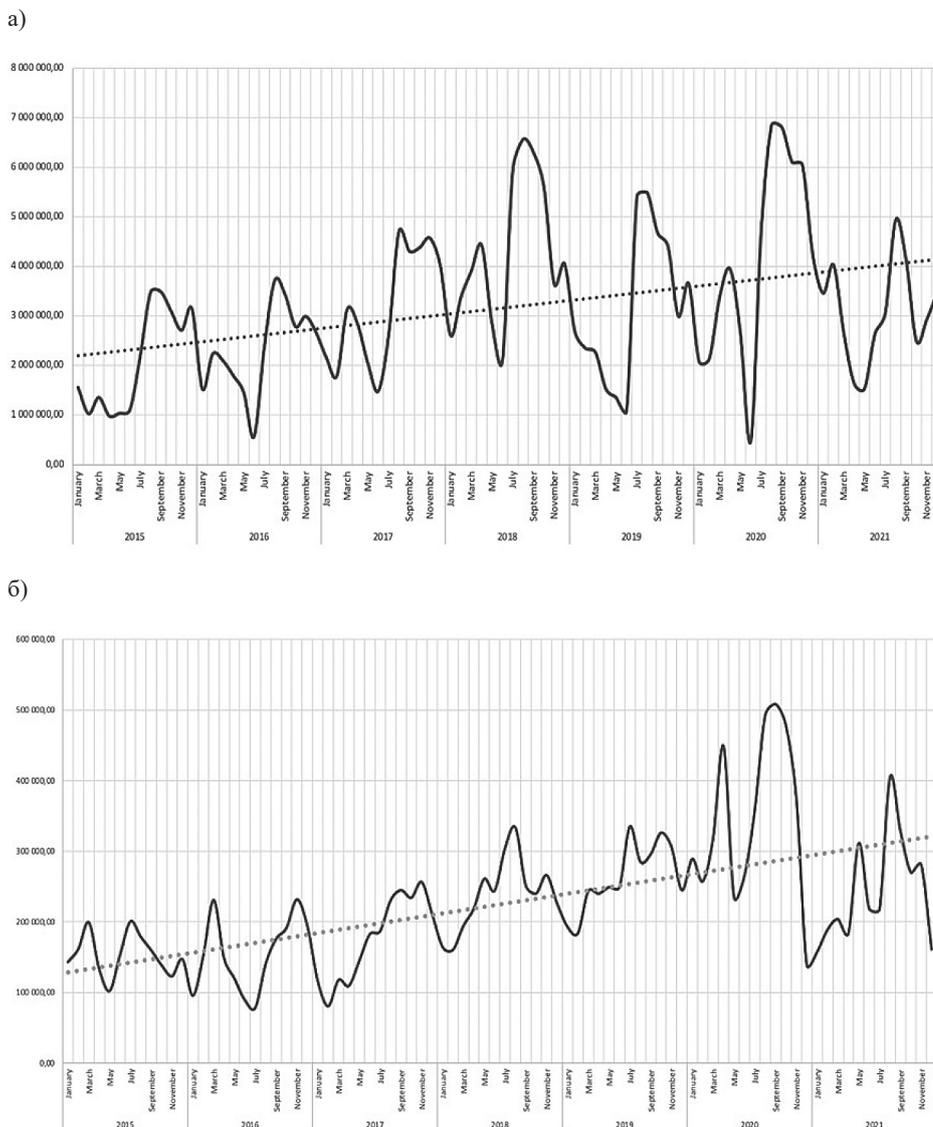


Рис. 1. Линия тренда экспортного грузопотока зерновых культур в период 2015–2021 гг., т:
 а — из портов Черноморско-Азовского бассейна; б — из портов Каспийского моря

Кривые тренда (обозначены пунктиром на рис. 1) практически являются линейными зависимостями: для Черноморско-Азовского бассейна описаны формулой (1), для Каспийского — формулой (2):

$$y = 2,8 \cdot 10^5 x + 2,0 \cdot 10^6; \quad (1)$$

$$y = 2,8 \cdot 10^4 x + 1,3 \cdot 10^5; \quad (2)$$

где y — величина грузопотока, т;

x — номер года за вычетом величины грузопотока за 2015 г.

Ежегодная величина прироста общего экспортного грузопотока зерновых грузов на Черном море составляет около 250–300 тыс. т, на Каспии — 25–30 тыс. т. Различие в коэффициентах наклона прямой тренда для бассейнов в 10 раз обусловлено значительными различиями в спросе на перевозки. Очевидно, что указанная тенденция к повышению объемов перевозок имеет постоянный характер и объясняется увеличением спроса на сельскохозяйственную продукцию, вызванного ростом народонаселения. Понимание этого позволяет делать определенные прогнозы при составлении программы пополнения флота. Выяснить причины общей тенденции к росту позволит детальное рассмотрение динамики изменения объемов перевозки зерновых грузов по номенклатуре.

Анализ объемов перевозки различных зерновых культур по номенклатуре из южных портов России в период 2015–2021 гг. свидетельствует о различных направлениях их изменения. Вне зависимости от геополитической обстановки, экономической ситуации и урожайности осуществляются перевозки практически стабильных объемов кукурузы и ячменя, при этом объем грузопотока мукомольной пшеницы подвержен значительным колебаниям (рис. 2). Кукурузу и ячмень наши импортеры закупают практически полностью, в то время как пшеницу выращивают в том числе самостоятельно, что приводит к волатильности рынка мукомольной пшеницы.

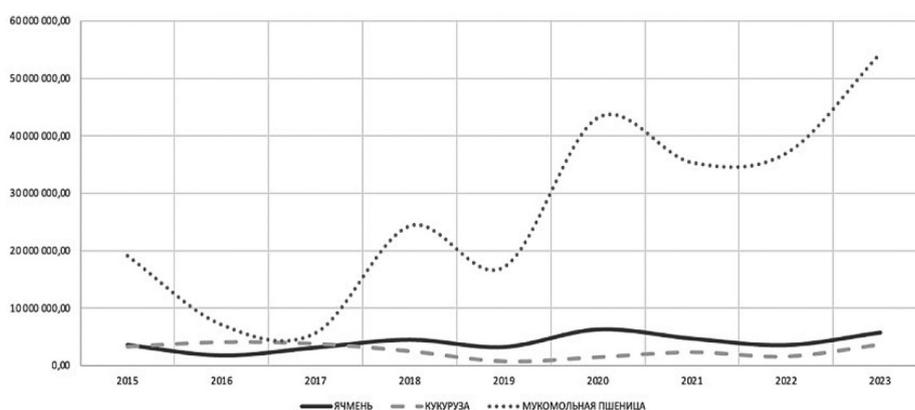


Рис. 2. Динамика изменения объемов перевозок отдельных зерновых культур из портов Черноморско-Азовского бассейна, т

В экспорте зерна из портов Каспийского моря [11] наблюдается несколько иная картина относительно объемов перевозок основных зерновых культур. Большую долю здесь занимает кукуруза, на которую приходится около 42 % от общего объема всего экспортируемого зерна, на ячмень приходится примерно 27 %, на мукомольную пшеницу — 24 %, оставшиеся 7 % — на другие зерновые. Необходимо отметить, что объемы перевозок зерна из портов Каспийского моря в разы, а в некоторых случаях и в десятки раз меньше экспортных грузопотоков из Азово-Черноморского бассейна. Основным потребителем российского зерна в этом бассейне является Иран, ввиду того что другие страны, имеющие выход к Каспийскому морю, являются крупными производителями и экспортерами зерновых культур.

Динамика экспорта рассматриваемых в данной статье номенклатурных групп зерновых культур из портов Каспия характеризуется значительно большей волатильностью, чем в Черноморско-Азовском бассейне (рис. 3). При этом на Каспии также наблюдается ежегодное увеличение экспорта зерновых несмотря на ограниченность маршрутов и числа импортеров в пределах рассматриваемого бассейна. Как видно из графика, наиболее устойчивой зерновой культурой к колебаниям объемов перевозок является ячмень. Следует отметить, что тенденции изменения грузопо-

токов кукурузы из Каспийского моря подобны картине изменения объемов экспортных перевозок мукомольной пшеницы из портов Азово-Черноморского бассейна [13], [14].

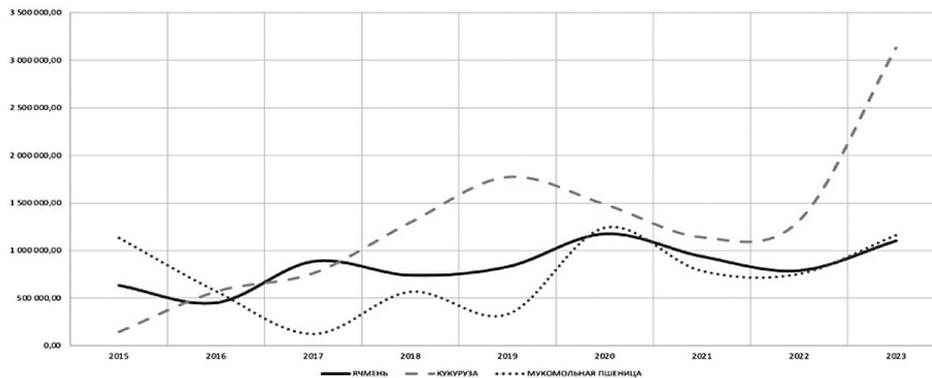


Рис. 3. Динамика изменения объемов перевозок отдельных зерновых культур из портов Каспийского бассейна, т

Таким образом, именно удельный вес основной номенклатурной группы перевозимых в регионе зерновых определяет величину коэффициента наклона линии тренда общего экспортного грузопотока на бассейне, что обуславливает необходимость установления «весовых коэффициентов» по каждому виду груза при оценке активности рынка перевозки зерновых культур. Следует отметить еще одну отличительную черту динамики изменения грузопотока зерновых культур — сезонность экспорта (рис. 4).

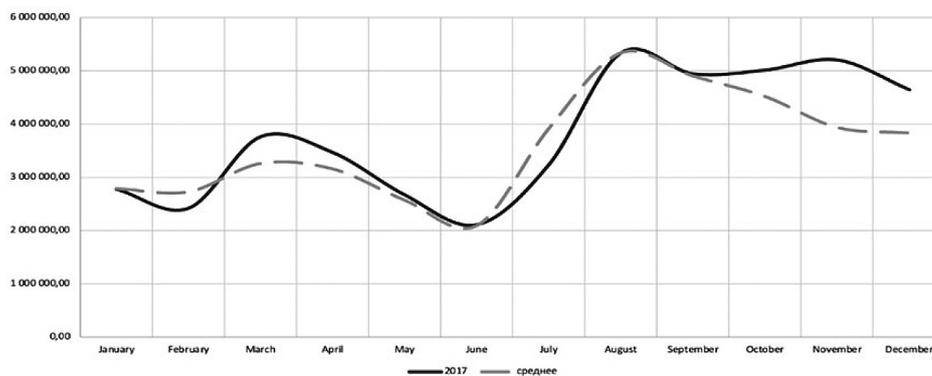


Рис. 4. Сезонность изменения объемов перевозок зерновых культур из портов Черноморско-Азовского бассейна, т

Для наглядности на графике представлены кривые изменения объема перевозок из портов Черноморско-Азовского бассейна за 2017 г. и среднего грузопотока из этого региона в период с 2015–2021 гг. Анализ имеющихся данных по перевозкам зерна показал наличие двух ярко выраженных временных пиков, которые наблюдаются ежегодно. Эти подъемы всегда случаются в марте–апреле и августе–сентябре. Причиной резкого увеличения объема экспортируемого зерна в период с марта по апрель является завершение посевного периода, после чего все излишки зерна прошлого года могут быть реализованы; пик, приходящийся на август–сентябрь, соответствует завершению сбора нового урожая. Таким образом, первый спад грузопотока в июне свидетельствует об отсутствии запасов зерна прошлого года для продажи, второй спад в конце каждого календарного года обусловлен достаточным количеством запасов зерна текущего года.

Для полноты картины следует проанализировать зависимость объема перевозок зерновых от времени года также и для Каспийского бассейна. Выполнено сравнение кривых изменения объема перевозок зерна за 2019 г. и среднего грузопотока из этого региона в период 2015–2021 гг. (рис. 5).

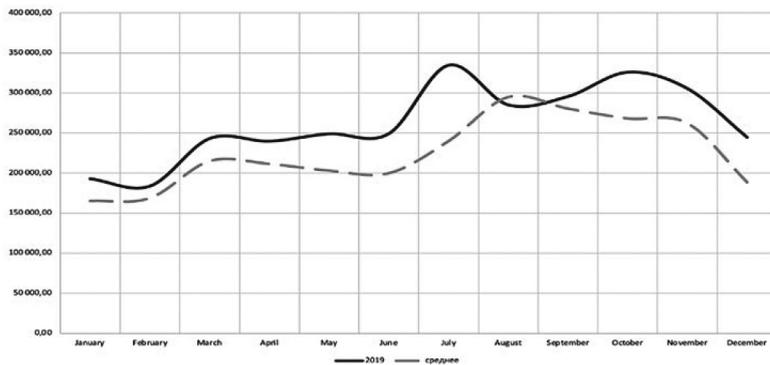


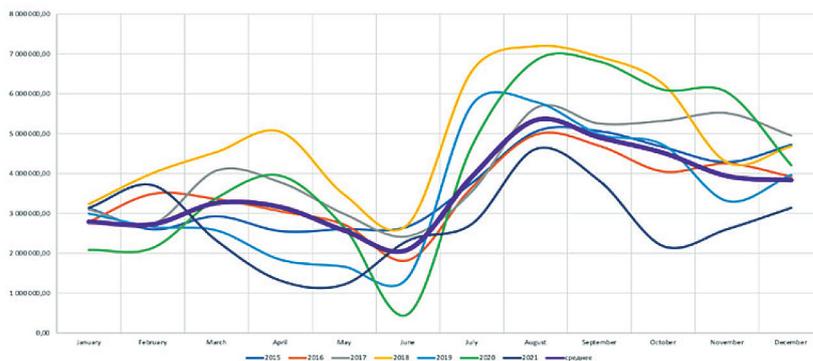
Рис. 5. Сезонность изменения объемов перевозок зерновых культур из портов Каспийского моря, т

Исследование графиков показало наличие лишь одного заметного временного «пика», приходящегося на промежуток март–апрель и соответствующего, как отмечалось ранее, реализации излишков зерна прошлого года. Второй подъем кривой выражен нечетко по времени и приходится на длительный период с июля по ноябрь, что обусловлено длительностью сезона уборки урожая кукурузы в зависимости от целей ее выращивания (силос, зерно, заготовки и т. п.) и метеоусловий.

Результаты (Results)

Особо следует отметить, что все кривые изменения грузопотоков по времени в течение каждого года, имеют схожую форму, т. е. тенденции их изменения одинаковы, поэтому они теоретически могут описываться аналогичными функциональными зависимостями, различающимися лишь коэффициентами [15].

а)



б)

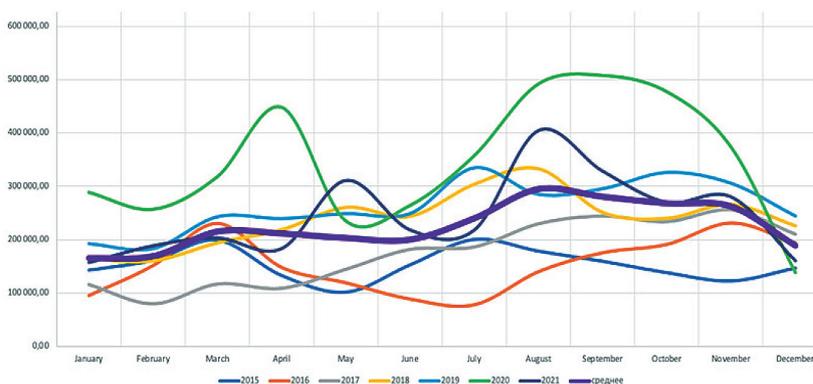


Рис. 6. Динамика изменения объемов перевозки зерновых культур в период 2015–2021 гг., т: а — из портов Черноморско-Азовского бассейна; б — из портов Каспийского моря

Таким образом, можно сделать вывод о том, что ежегодные кривые грузопотоков примерно повторяют «среднюю» кривую (рис. 6), которая должна сдвигаться ежегодно вверх в соответствии с формулами (1) и (2) в случае принятия за «базовый» первого года из рассматриваемых за период 2015–2021 гг. Вместе с тем целесообразно принимать базовым тот год, который наиболее близок по форме к «средней» кривой.

Заключение (Conclusion)

В работе проанализированы экспортные грузопотоки зерновых культур из портов Черноморско-Азовского и Каспийского бассейнов. На основании результатов проведенного исследования можно сделать вывод о наличии очевидных закономерностей в динамике изменения объемов перевозок зерна, к которым относятся:

- стабильность номенклатуры перевозимых грузов;
- ежегодный рост грузопотоков по основным видам зерновых культур и, соответственно, увеличение суммарных грузопотоков на бассейнах;
- ярко выраженная сезонность перевозок;
- кривые объемов перевозок за различные годы стремятся к усредненной кривой грузопотоков за весь анализируемый период.

Необходимо отметить устойчивость выявленных закономерностей на протяжении всего анализируемого в данном исследовании периода вне зависимости от состояния экономики отдельных стран (как импортирующих, так и экспортирующих), мировой экономики в целом, а также геополитической ситуации и иных объективных причин. Формализация этих тенденций позволит с достаточной степенью вероятности прогнозировать ежегодные изменения в объемах экспортных перевозок зерновых культур из южных регионов России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Терешина Н. П. Анализ рынка грузовых перевозок и факторов, определяющих современные тренды развития транспортного комплекса / Н. П. Терешина, Е. В. Дмитриева, А. П. Маслова // Логистика. — 2023. — № 10(203). — С. 15–19. DOI: 10.54959/22197222_2023_10_15. — EDN BVUBFR.
2. Кравец А. С. Развитие логистики перевозки зерна в железнодорожно-морском сообщении (на примере Южного региона) / А. С. Кравец, Е. А. Чеботарева // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2017. — № 3(67). — С. 102–112. — EDN ZISXXH.
3. Слищан, А. Е. Структура системы «Рынок продукции морского транспорта» / А. Е. Слищан, С. А. Слищан // Эксплуатация морского транспорта. — 2006. — № 2(46). — С. 3–6. — EDN HVPJFH.
4. Сипаро К. А. Прогнозирование грузовой базы морского транспорта как элемент перспективного планирования развития отрасли: автореф. дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05 / К. А. Сипаро. — М.: ФГБОУ ВО Государственный университет управления, 2017. — 22 с. — EDN ZQDXJX.
5. Дэльз С. В. Развитие транспортно-логистической системы экспортной перевозки зерна: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С. В. Дэльз. — М: Московский государственный университет путей сообщения, 2012. — 23 с. — EDN QIDVKB.
6. Матвеев Д. М. Роль транспортных затрат в повышении конкурентоспособности российского зерна на мировом рынке / Д. М. Матвеев // Логистика сегодня. — 2014. — № 2. — С. 122–128. — EDN SCXUFL.
7. Бережной В. И. Проблемы транспортно-логистической системы России в современных условиях (на примере экспорта зерна) / В. И. Бережной, М. В. Сероштан, Т. Г. Марцева [и др.] // Вестник Института экономики Российской академии наук. — 2022. — № 3. — С. 52–72. DOI: 10.52180/2073–6487_2022_3_52_72. — EDN AYTAIZ.
8. Бородина А. С. Особенности логистической инфраструктуры на рынке зерновых культур / А. С. Бородина // Вестник Ростовского государственного экономического университета (РИНХ). — 2022. — № 4(80). — С. 15–19. DOI: 10.54220/v.rsue.1991–0533.2023.80.4.002. — EDN GWUPHT.
9. Артамонова М. Ю. Аналитический обзор экспортных грузопотоков навалочных и насыпных грузов через южные порты России / М. Ю. Артамонова // Современные аспекты экономики. — 2020. — № 12–2(280). — С. 25–37. — EDN DTFFGF.

10. Марченко С. С. Экономические основы прогнозирования объемов морских перевозок навалочных грузов / С. С. Марченко // Вестник Забайкальского государственного университета. — 2022. — Т. 28, № 3. — С. 105–111. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-3-105-111. — EDN EXNWZY.
11. Окорочков Н. С. Перспективы участия водного транспорта России в перевозке экспортного зерна в страны Каспийского региона / Н. С. Окорочков, Е. В. Зарецкая // Наукосфера. — 2024. — № 4–2. — С. 368–372. DOI: 10.5281/zenodo.11071414. — EDN DLREMV.
12. Гриб А. И. Пути увеличения пропускной способности портовых зерновых терминалов Азово-Черноморского бассейна Российской Федерации // Проблемы и перспективы устойчивого развития морской транспортной отрасли: коллективная монография / А. И. Гриб [и др.]. — Уфа: ООО «Аэтерна», 2017. — 138 с. — EDN YLRONZ.
13. Дребезова О. А. Генезис мирового рынка зерна: предпосылки, специфика, этапы развития / О. А. Дребезова // Межотраслевые исследования как основа развития научной мысли: монография. — Вып. 71. — Уфа: ООО «Аэтерна», 2022. — 234 с. — EDN OVBOIE.
14. Гогина М. А. Исследование фрахтового рынка зерна в Азово-Черноморском бассейне / М. А. Гогина, И. А. Русинов // Региональные аспекты управления, экономики и права Северо-западного федерального округа России. — 2023. — № 1(57). — С. 14–19. — EDN QIRMGА.
15. Фунтусов А. А. Приложение теории массового обслуживания к построению теоретической модели фрахтового рынка / А. А. Фунтусов // Вестник Морского государственного университета. — 2014. — № 66. — С. 54–61. — EDN QZASNS.
16. Алтухов А. И. Инфраструктурное и логистическое обеспечение экспортных поставок российского зерна: состояние и перспективы развития / А. И. Алтухов, А. М. Рахманов // Экономика сельского хозяйства России. — 2022. — № 5. — С. 62–71. DOI: 10.32651/225-62. — EDN YZUOJC.

REFERENCES

1. Tereshina, N. P., Dmitrieva, E. V. and Maslova A. P. “Analiz rynka gruzovyh perevozok i faktorov, opredelyayushchih sovremennye trendy razvitiya transportnogo kompleksa.” *Logistika*. 10(203). (2023): 15–19. DOI: 10.54959/22197222_2023_10_15.
2. Kravec, A. S. and Chebotareva E. A. “Razvitie logistiki perevozki zerna v zheleznodorozhno-morskom so-obshchenii (na primere Yuzhnogo regiona).” *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya* 3(67) (2017): 102–112.
3. Slican, A. E. and Slican, S. A. “Struktura sistemy “Rynok produkcii morskogo transporta.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2(46) (2006): 3–6.
4. Siparo, K. A. Prognozirovanie gruzovoj bazy morskogo transporta kak element perspektivnogo planirovaniya razvitiya otrasli. PhD diss. M: FGBOU VO Gosudarstvennyj universitet upravleniya, 2017.
5. Del’z, S. V. Razvitie transportno-logisticheskoy sistemy eksportnoj perevozki zerna. PhD diss. M: Moskovskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya, 2012.
6. Matveev, D. M. “Rol’ transportnyh zatrat v povyshenii konkurentosposobnosti rossijskogo zerna na mirovom rynke.” *Logistika segodnya*. 2 (2014): 122–128.
7. Bereznoj, V. I., Seroshtan, M. V., Marceva, T. G., et al. “Problemy transportno-logisticheskoy sistemy Rossii v sovremennyh usloviyah (na primere eksporta zerna).” *Vestnik Instituta ekonomiki Rossijskoj akademii nauk*. 3 (2022): 52–72. DOI: 10.52180/2073-6487_2022_3_52_72.
8. Borodina, A. S. “Osobennosti logisticheskoy infrastruktury na rynke zernovyh kul’tur.” *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta (RINH)* 4(80) (2022): 15–19. DOI: 10.54220/v.rsue.1991-0533.2023.80.4.002.
9. Artamonova, M. YU. “Analiticheskij obzor eksportnyh gruzopotokov navalochnyh i nasypnyh gruzov cherez yuzhnye porty Rossii.” *Sovremennye aspekty ekonomiki* 12–2(280) (2022): 25–37.
10. Marchenko, S. S. Ekonomicheskie osnovy prognozirovaniya ob’emov morskikh perevozok navalochnyh gruzov / S. S. Marchenko // *Vestnik Zabajkal’skogo gosudarstvennogo universiteta* 28.3 (2022): 105–111. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-3-105-111.
11. Okorokov, N. S. and Zareckaya E. V. “Perspektivy uchastiya vodnogo transporta Rossii v perevozke eksportnogo zerna v strany Kaspijskogo regiona.” *Naukosfera* № 4–2 (2024): 368–372. DOI: 10.5281/zenodo.11071414.
12. Grib, A. I. Puti uvelicheniya propusknoj sposobnosti portovyh zernovyh terminalov Azovo-Chernomorskogo bassejna Rossijskoj Federacii / A. I. Grib // *Problemy i perspektivy ustojchivogo razvitiya morskoy*

transportnoj otrasli: kollektivnaya monografiya. — Ufa: Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'yu “Aeterna”, 2017. — S. 64–78. — EDN YLRONZ.

13. Drebezova, O. A. Genesis mirovogo rynka zerna: predposylki, specifika, etapy razvitiya / O. A. Drebezova // MEZHOTRASLEVYIE ISSLEDOVANIYA KAK OSNOVA RAZVITIYA NAUCHNOJ MYSLI: monografiya. Vypusk 71. — Ufa: Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'yu “Aeterna”, 2022. — S. 45–58. — EDN OBBOIE.

14. Gogina, M. A. “Issledovanie frahtovogo rynka zerna v Azovo-CHernomorskom bassejne.” *Regional'nye aspekty upravleniya, ekonomiki i prava Severo-zapadnogo federal'nogo okruga Rossii* 1(57) (2023): 14–19.

15. Funtusov, A. A. “Prilozhenie teorii massovogo obsluzhivaniya k postroeniyu teoreticheskoy modeli frahtovogo rynka.” *Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta* 66 (2014): 54–61.

16. Altuhov, A. I. and Rahmanov A. M. “Infrastrukturnoe i logisticheskoe obespechenie eksportnykh postavok rossijskogo zerna: sostoyanie i perspektivy razvitiya” *Ekonomika sel'skogo hozyajstva Rossii* 5 (2022): 62–71. DOI: 10.32651/225–62.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Березин Алексей Осипович —
доктор экономических наук, профессор,
заместитель генерального директора
ФАУ «Российский морской регистр судоходства»
191186, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Дворцовая набережная, дом 8
e-mail: berezin.ao@rs-class.org

Сперанская Яна Андреевна — студент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_top@gumrf.ru

Прозоров Кирилл Владимирович —
доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова» 198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: prozorovkv@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Berezin, Aleksey O., —
Grand PhD in Economics, professor,
Deputy General Director
FAI «Russian Maritime Register of Shipping»
8 Palace Emb., St. Petersburg, 191186,
e-mail: berezin.ao@rs-class.org

Speranskaya, Yana A. — Student
Supervisor:
Slitcan, Andrey E. Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg,
198035, Russian Federation
e-mail: kaf_top@gumrf.ru

Prozorov, Kirill V. —
Docent Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg,
198035, Russian Federation
e-mail: prozorovkv@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 15 сентября 2024 г.
Received: September 15, 2024*

UNIVERSAL SIMULATION MODEL OF THE FLOW OF SHIPS TO THE SEA CARGO FRONT OF THE PORT

A. L. Kuznetsov¹, O. A. Chistotin², M. J. Zatolokina¹

¹ Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping»,
St. Petersburg, Russian Federation

² AO "NPO" Akonit", Vologda, Russia

The article describes the results of completed research aimed at clarifying the primary base of methods for technological design of ports and terminals. Along with the main parameter expected annual cargo traffic, the key for all such calculations is the structure of the ship traffic that implements this cargo flow, or the flow of the fleet of ships that sell cargo traffic. Each type of vessel is characterized by its own parameters, which determine the duration of service in the port and, ultimately, the occupancy of berths. Traditional analytical methods, without disputing the randomness of the nature of all initial and intermediate values, prescribe the use of average values for the assessment of final technological resources, correcting the results obtained by coefficients of engineering ignorance. This assumption, which makes it possible to use simple algebraic methods for working with deterministic quantities, excludes the emergence of any means of estimating the possible dispersion of values around the obtained average values. In the practice of investment-intensive facilities, such as seaports, the degree of dispersion of parameters characterizes the probability of errors of the first and second types: the creation of insufficient capacity, leading to losses from waiting in the queue for service, and the creation of excess capacity associated with the loss of excess capitalization. There is no objective measure that determines the balance between these losses, since the decision is purely entrepreneurial, based on the risk of losses and possible gains. This study describes a tool that allows you to make appropriate entrepreneurial decisions fairly objectively.

Keywords: seaports, terminals, technological design, simulation modeling.

For citation:

Kuznetsov Alexander L., Chistotin Oleg A., Zatolokina Marina J. "Universal simulation model of the flow of ships to the sea cargo front of the port" *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 16.5 (2024): 700–708. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-700-708.

УДК 656.6

УНИВЕРСАЛЬНАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПОТОКА ПОСТУПЛЕНИЯ СУДОВ НА МОРСКОЙ ГРУЗОВОЙ ФРОНТ ПОРТА

А. Л. Кузнецов¹, О. А. Чистотин², М. Ю. Затолокина¹

¹ ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация,

² АО «НПО «Аконит»», г. Вологда, Российская Федерация

В статье дано описание результатов исследований, направленных на уточнение первичной базы методов технологического проектирования морских портов и терминалов. Наряду с основным параметром — ожидаемым годовым грузопотоком, ключевым вопросом для всех подобных расчетов является структура потока судов, реализующего грузопоток. Отмечается, что каждый тип судна характеризуется определенными параметрами, от которых зависит продолжительность обслуживания в порту и, в конечном счете, занятость причалов. Подчеркивается, что с учетом случайности характера всех исходных и промежуточных величин традиционные аналитические методы предписывают использование для оценки конечных технологических ресурсов средние величины, позволяющие корректировать полученные результаты, что дает возможность использования простых алгебраических методов работы с детерминированными величинами и исключает появление каких-либо средств оценки возможного разброса значений вокруг полученных средних величин. Обращается внимание на то, что в практике работы таких инвестиционно емких объектов, как морские порты, степень разброса параметров характеризует вероятности ошибок первого и второго рода, а именно создание недостаточных мощностей, приводящих к возникновению потерь от ожидания в очереди на обслуживание, и избыточных мощностей, связанных с потерей

избыточной капитализации. На основе проведенного исследования можно сделать вывод о том, что объективной меры, определяющей баланс между этими потерями, не существует, поскольку решение является сугубо предпринимательским, основанном на риске потерь и возможных выигрышей. В предлагаемом исследовании приведено описание инструмента, позволяющего достаточно объективно принимать соответствующие предпринимательские решения.

Ключевые слова: морские порты, терминалы, расчетные величины, поправочные коэффициенты, технологическое проектирование, имитационное моделирование, грузопотоки.

Для цитирования:

Кузнецов А. Л. Универсальная имитационная модель потока поступления судов на морской грузовой фронт порта / А. Л. Кузнецов, О. А. Чистотин, М. Ю. Затолокина // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 5. — С. 700–708. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-700-708.

Введение (Introduction)

При расчете требуемых терминальных мощностей, рекомендуемых нормативными документами и используемых в практике проектирования морских портов, используются детерминированные величины. Случайную природу исходных, промежуточных и конечных расчетных величин необходимо учитывать в соответствующих методах введением поправочных коэффициентов, изменяющих значения пропорционально неопределенности и неуверенности в них.

В большинстве случаев значения коэффициентов и расчетных констант задаются нормативно, без объяснения способа выбора и обоснования его объективности, а понятие *достаточности* интерпретируется как гарантированно больший размер оцениваемого ресурса по сравнению с возможной потребностью в нем. В полной мере это относится к расчету числа и характеристик причалов, парка технологического (подъемно-транспортного) оборудования, ожидаемой производительности, параметров обслуживания, емкости складов и иных ключевых элементов портовой инфраструктуры. В то же время ошибки в расчетах, приводящие к нехватке технологических ресурсов (так называемые «ошибки первого рода»), напрямую снижают качество оказываемых терминалом услуг, что отражается на конкурентной позиции порта. Ошибки иного рода связаны с созданием избыточных технологических мощностей, обладающих высокой капиталоемкостью, и возникающими вследствие этого финансово-экономическими потерями портов и терминалов.

В современных условиях задачей морской отрасли страны является масштабное реформирование портового сектора, вызванное глобальными изменениями торговых направлений и радикальной переориентацией соответствующих грузопотоков. Эту задачу необходимо решить в кратчайшие сроки в условиях ограниченности выделяемых для этих целей средств. В данной работе приведено описание метода расчета базовых параметров работы морского грузового фронта терминала общего вида на основе использования имитационного моделирования.

Целью работы является создание унифицированного инструмента для генерации потока судов по заданному вероятностному закону, который может быть использован во многих задачах имитационного моделирования работы морских портов и терминалов.

Методы и материалы (Methods and Material)

В практике технологического проектирования морских перегрузочных комплексов, портов и терминалов расчеты основных параметров строго регламентированы действующими нормами [1], [2]. Недостатки и ограничения подобного подхода в последнее время отмечают многие исследователи как в нашей стране [3]–[5], так и за рубежом [6], [7]. Основным входным параметром для технологических расчетов, связанных с оценкой требуемого объема указанных ранее ресурсов, является состав флота судов, характеристики которых входят практически во все используемые математические методы [1], [5]. Суда-представители в конкретном проекте могут значительно отличаться друг от друга по своим характеристикам, поэтому в выполняемых расчетах неявно выполнено их усреднение. Например, интенсивность погрузочно-разгрузочных работ $P_{сут}$ определяют,

исходя из продолжительности грузовых работ и производственных стоянок при обработке расчетных судов, как средневзвешенную величину:

$$P_{\text{сут}} = \frac{1}{\sum_{j=1}^m \frac{A_j (t_{\text{гр}j} + t_{\text{п.с}j})}{24D_j}}, \quad (1)$$

где m — количество типов расчетных судов;

A_j — доля расчетных судов типа j в общем объеме расчетного грузооборота Q ;

$t_{\text{гр}j}$ — время занятости причала выполнением грузовых работ при обработке судна типа j , ч;

$t_{\text{п.с}j}$ — среднее время занятости причала под производственными стоянками судна типа j , ч;

D_j — расчетная загрузка судна типа j , т.

В рассматриваемом случае отдельное судно j загрузкой D_j обрабатывается за валовое время $(t_{\text{гр}j} + t_{\text{п.с}j})$, валовая суточная интенсивность $p_j = \frac{24D_j}{t_{\text{гр}j} + t_{\text{п.с}j}}$, доля судов j в грузопотоке $A_j Q$,

общее время обработки всех расчетных судов типа j составляет $T_j = \frac{A_j Q}{p_j}$. При этом общее время

обработки судов всех типов у причалов проектируемого комплекса $T = \sum_{j=1}^m T_j$.

Разделив весь грузопоток Q на общее время его обработки T , получим указанную в Своде правил¹ формулу, по сути, представляющую известную величину гармонического среднего:

$$P_{\text{сут}} = \frac{Q}{T} = \frac{Q}{\sum_{j=1}^m T_j} = \frac{Q}{\sum_{j=1}^m \frac{A_j Q}{p_j}} = \frac{1}{\sum_{j=1}^m \frac{A_j (t_{\text{гр}j} + t_{\text{п.с}j})}{24D_j}}. \quad (2)$$

Иными словами, исходя из предполагаемых величин (состава судов, их доли в расчетном грузообороте и технологических параметров обработки у причала), определяется обобщенная величина: суточная производительность при непрерывной работе на усредненное судно. Полученное значение используется для расчета требуемого числа причалов.

Очевидно, что случайный характер используемых величин обуславливает возможные отклонения (флуктуации) реальных результирующих значений от среднего, даже если последнее рассчитано верно. Степень разброса этих значений и их вероятность в аналитических методах, в которых используются средние величины, не может быть оценена. Однако именно отклонения в практике работы портов вызывают потери в виде простоев и очередей в ожидании на обслуживание транспортных средств (морских и наземных) и технологического оборудования.

Базовой методической причиной невозможности получения полного статистического анализа расчетных параметров при использовании нормативных методов являются операции с усредненными детерминированными величинами, выполняемые в соответствии с используемыми математическими приемами.

Моделируемым объектом (процессом) в данном исследовании является поток судов, заходящий в произвольный морской порт, т. е. коммерческий порт, предназначенный для любого вида грузов. В зависимости от способа организации морских перевозок суда в потоке следуют либо по расписанию (в линейном судоходстве), либо случайным образом (в трамповом судоходстве). Движение судов по расписанию связано с фиксированными интервалами между их прибытиями (например, это могут быть судозаходы два раза в неделю: в среду и пятницу). Как следствие, возникает фиксированная пара интервалов прибытия: двое и пять суток. Средний интервал между судозаходами, в данном случае составляющий 3,5 сут, не отражает специфики их детерминированного неравномерного распределения, что является наглядной иллюстрацией методических сложностей проведения аналитических расчетов.

¹ СП 350.132600.2018. Нормы технологического проектирования морских портов. Дата введ. 01.09.2018.

Суда, движущиеся в трамповом судоходстве, прибывают в порт со случайным интервалом между заходами. Тип и параметры распределения соответствующей случайной величины определяются особенностями организации и характеристиками маршрута. Как правило, для простоты расчетов при использовании методов теории вероятности и теории массового обслуживания в качестве типа распределения выбирается распределение Пуассона [8], [9]. В более детальных исследованиях используют распределения Эрланга различных порядков [5], [10], выбор которых основан на изучении отдельных частных характеристик судопотоков.

В настоящем исследовании предлагается обойти ограничения, возникающие как на основе фиксированных неравномерных ограничений линейного движения, так и являющиеся следствием фиксированного типа выбранного закона распределения, за счет использования произвольных индивидуальных характеристик случайных величин. С этой целью все расчетные суда разделяются на две категории: *следующие по расписанию* и *прибывающие случайно*. Пример задания характеристик расчетного грузопотока и реализующего его судопотока для имитационного моделирования приведен на рис. 1.

		Годовой грузооборот	Q	3 029 600	[т/год]							
Судоходство линейное												
Судно	Вместимость	Грузооборот		1 029 600	[ТЕУ/год]	расписание судозаходов						
Тип	ТЕУ		Тип захода	Число судов		пн	вт	ср	чт	пт	сб	вс
СК-1000	3000		расп	52					1			
СК-4000	4000		расп	104				1		1		
Судоходство трамповое												
<small>Примечание: судозаход обозначается 1</small>												
Судно	Вместимость	Грузооборот		2 000 000	[режим]							
Тип	ТЕУ	Доля в грузообороте, %	Тип захода	Число судов	Порядок							
СК-1000	1000	5	Эрланг	56	4							
СК-2000	2000	15	Эрланг	83	4							
СК-3000	3000	25	Эрланг	93	4							
СК-4000	4000	30	Эрланг	83	4							
СК-5000	5000	25	Эрланг	56	4							
ИТОГО		100%										

Рис. 1. Пример задания структуры грузопотока и судопотока (экранная форма)

Полный расчетный грузопоток состоит из грузопотока судов, движущихся по расписанию $Q_{\text{расп}}$, и заходящих в порт случайным образом $Q_{\text{трамп}}$. Для судов, движущихся по расписанию, указывается их загрузка и конкретное время заходов. Если судно типа i с загрузкой v_i прибывает n_i раз в неделю, оно формирует частный грузопоток $q_i = 52v_i n_i$. Грузопоток, обеспечиваемый линейным расписанием, составляет, таким образом, величину $Q_{\text{расп}} = \sum_i q_i$. Как видно из ранее изложенного, эта компонента грузопотока задается расписанием и вместимостью соответствующих судов.

Прибывающие случайно расчетные суда делятся на группы, в каждой из которых кроме долей участия в общем грузопотоке, в данном случае расчетный грузопоток $Q_{\text{трамп}}$, формируемый трамповыми судами, задается непосредственно, и каждый частный грузопоток судов типа j рассчитывается как

$$q_j = Q_{\text{трамп}} A_j.$$

Загрузка каждого судна v_j позволяет рассчитать среднее число судозаходов в год:

$$n_j = \frac{Q_j}{v_j},$$

формирующее математическое ожидание распределения интервалов для судов этого типа:

$$m_j = MO[T_{\text{инт}}^j] = \frac{365}{n_j}.$$

Этот параметр необходим для задания любого распределения независимо от его вида. Другим параметром в большинстве случаев является характеристика рассеивания, задаваемая обычно

в виде дисперсии D_x , стандартного отклонения $\sigma_x = \sqrt{D_x}$ или относительного стандартного отклонения $r_x = \frac{\sigma_x}{m_j}$. Значение данного параметра, как и закон распределения, не выводятся из исходных расчетных данных и устанавливаются пользователем при эксперименте с моделью.

Пусть интервал между заходами судов типа j подчиняется произвольному закону распределения $F_j(T_{\text{инт}}^j)$. Если генерировать некоторую случайную величину ϵ , равномерно распределенную на интервале $[0; 1]$, то значения обратной функции $F_j^{-1}(\epsilon)$ будут представлять собой реализацию случайной величины, распределенной по этому закону: $T_{\text{инт}}^j = F_j^{-1}(\epsilon)$. Иными словами, для каждого выбранного типа судов существует возможность сформировать совокупный поток прибытия в порт, подчиняющийся соответствующему закону распределения (рис. 2).

сутки		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
расписание	1				+							+							+							+					
	2			+		+					+	+						+	+						+	+					
трамп	3											+							+												+
	4					+	+						+					+					+	+							+
	5						+	+					+	+				+				+					+				
	6							+	+				+	+	+												+	+			+

Рис. 2. Пример генерации судозаходов расчетных судов

Полученный таким образом совокупный поток может служить основой для выполнения более точных технологических расчетов, чем алгебраические методы и методы Монте-Карло.

Результаты (Results)

Для иллюстрации того, как полученные данные моделирования могут использоваться в расчетах, рассмотрим грузопоток, заданный примером, приведенным на рис. 2. Параметры примера сведены в следующую таблицу:

Тип	N i	T i, сут	T i, сут
1	52	2	104
2	104	3	312
3	58	2	116
4	90	3	270
5	93	3	279
6	84	4	336
7	54	4	216
Всего:	535	T обл, сут	1434
		n прич	3,9

Судно, пришедшее на терминал в некоторый момент времени (см. рис. 2), требует для своей обработки причала в течение времени, соответствующего его типу (см. данные, приведенные в таблице). Новое судно, пришедшее в течение обслуживания очередного судна, предъявляет свои требования к причалу, как и все последующие. Как следствие, поток судов, определенный на рис. 2, формирует динамически меняющиеся требования к количеству причалов.

Совокупное число судозаходов и время обслуживания судов устанавливают требования к бюджету времени обслуживания, равному 1435 сут. Следовательно, при плановом бюджете времени одного причала, равном 365 сут, совокупный бюджет четырех причалов, а именно 1460 сут, фактически позволяет обеспечить их обслуживание. Именно такое количество причалов рекомендуется выбирать в соответствии с требованиями, установленными в нормативных документах, в основе которых находятся алгебраические расчеты. В то же время результаты моделирования

показывают, что вследствие случайного характера прибытия судов в порт в определенные сутки требования к количеству причалов будут достигать в два раза больших значений (рис. 3).

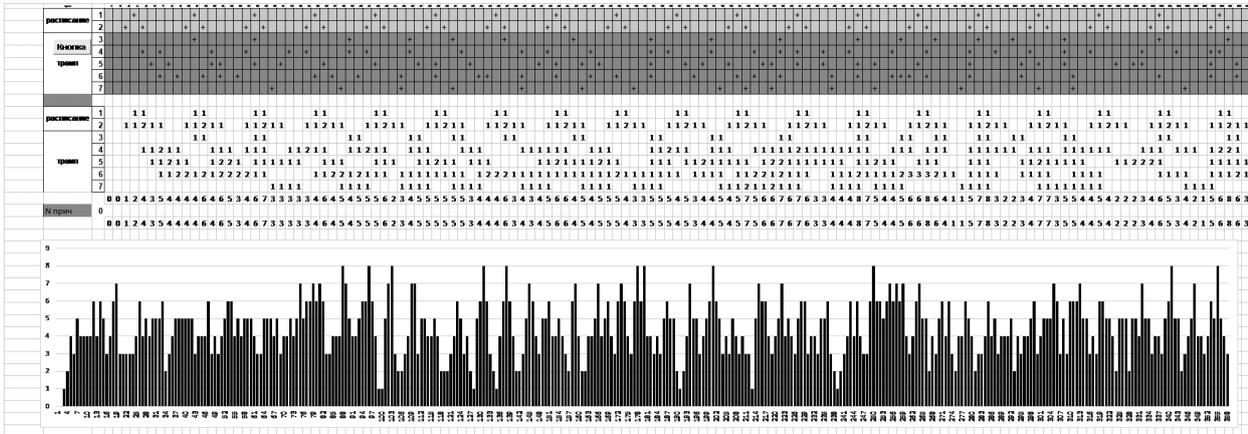
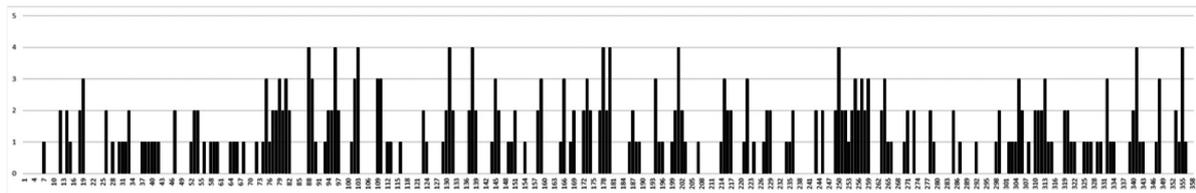


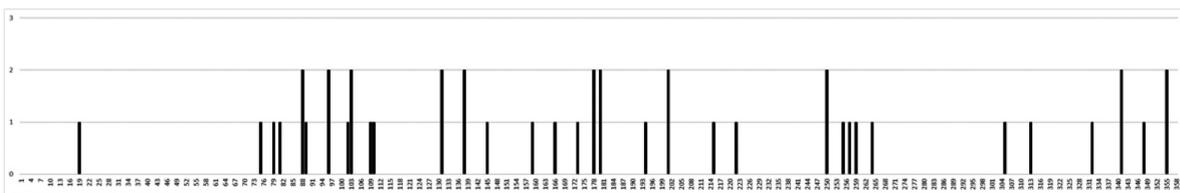
Рис. 3. Требования к количеству причалов, определяемые потоком судов

В случае четырех причалов, рассчитанных в соответствии с нормативными документами, в течение значительного периода времени требования к причалам останутся неудовлетворенными (рис. 4, а). Требования к количеству причалов, превышающие их выбранное количество, приводят к появлению очереди судов на рейде. Более того, дальнейшее увеличение числа причалов до шести и даже семи не гарантирует отсутствие очереди (рис. 4, б, в).

а)



б)



в)

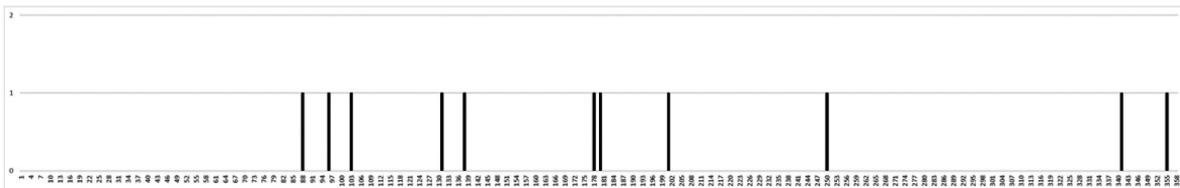


Рис. 4. Неудовлетворенные требования для обслуживания:

а — при четырех причалах; б — при шести причалах; в — при семи причалах

Следует отметить, что приведенные на рис. 3 и 4 результаты являются оценкой длины очереди снизу, поскольку учитывают лишь приход судна в момент теоретической занятости причала пришедшими ранее судами: в действительности, стоящее в очереди судно может занять освободившийся причал, тем самым увеличив время ожидания в очереди. Тем не менее этот

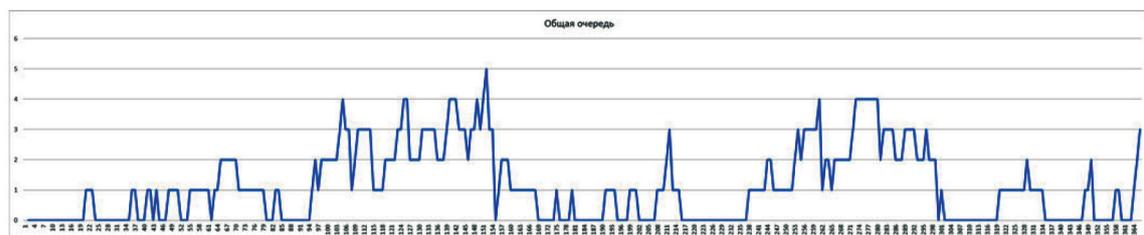
способ представляется достаточно эффективным на стадиях предварительной проработки технологических проектов, но для этого требуется установление его адекватности.

Обсуждение (Discussion)

Причалы и поступающие для обработки на них суда образуют обобщенную систему массового обслуживания. Приход судна на терминал является заявкой, причал — каналом ее обслуживания. В то же время классические методы теории массового обслуживания в данном случае неприменимы, поскольку не выполняются требования к стохастическим характеристикам входного потока (он не является простейшим), а время обработки каждой заявки не подчиняется закону Пуассона.

Для доказательства адекватности предлагаемого метода была выполнена реализация традиционной исполняемой модели подобной системы в среде VBA. На рис. 5 показаны результаты моделирования, выполненного с помощью разработанной модели неоднородной системы массового обслуживания для потока судов с параметрами примера, приведенного на рис. 1.

а)



б)



Рис. 5. Очередь судов, ожидающих обслуживания:
а — при шести причалах; б — при семи причалах

Сравнение данных имитационного моделирования, выполненного двумя разными способами, показывает близость полученных результатов. Указанное обстоятельство можно считать обоснованным доказательством адекватности используемой в проекте модели. Еще одним обоснованным доказательством является совпадение результатов имитационного моделирования с расчетами, выполненными с использованием аналитического метода при отключении всех случайных механизмов и вырожденном режиме работы программного обеспечения в режиме алгебраических действий с детерминированными значениями. Основным результатом, позволяющим получить использование имитационного моделирования, является формирование характеристик разброса расчетных величин вокруг средних значений, что недоступно аналитическим методом.

Заключение (Conclusion)

Нормативные методы технологического расчета морских портов и терминалов основаны на устаревшей парадигме алгебраических методов. Использование алгебраических методов в свое время позволило избежать грубых ошибок при проектировании морских торговых портов и терминалов за счет статистической агломерации и усреднения.

Ужесточение требований к эксплуатационным характеристикам существующих и проектируемых портов и терминалов в условиях резкого усложнения условий выживаемости и конкурентоспособности привело к появлению более жестких требования к качеству и срокам проектных

решений. Одним из способов достижения решения этой проблемы является создание инновационных инструментов, в первую очередь за счет разработки средств имитационного моделирования. Создаваемые средства позволяют увеличить возможности существующего инструментария, не выходя за пределы имеющегося опыта проектирования, а также создания и эксплуатации инфраструктурных объектов выбранной категории. Рассмотрен пример решения подобной задачи и доказательство адекватности ее решения, что позволяет надеяться на возможность широкого использования предложенных решений в практике технологического проектирования морских торговых портов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреева Л. А. Задачи совершенствования методов технологического проектирования морских торговых портов в новых условиях / Л. А. Андреева, А. Л. Кузнецов, А. М. Сампиев, А. Д. Семенов // *Транспортное дело России*. — 2024. — № 1. — С. 164–166. — EDN CERHHD.
2. Кузнецов А. Л. О несовершенстве нормативной базы технологического проектирования морских портов / А. Л. Кузнецов, В. А. Погодин // *Морские порты России*. — 2017. — № 6. — С. 18.
3. Сампиев А. М. Применение метода Монте-Карло для оценки эффективности использования бюджета рабочего времени морского терминала / А. М. Сампиев // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11, № 1. — С. 68–77. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-68-77. — EDN KFDSNQ.
4. Валькова С. С. Методика оценки склада морского порта методами имитационного моделирования / С. С. Валькова, Ю. И. Васильев // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11, № 3. — С. 485–498. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-485-498. — EDN FZEPJJ.
5. Кузнецов А. Л. Роль имитационного моделирования в технологическом проектировании и оценке параметров грузовых терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. А. Погодин, В. Н. Щербаква-Слюсаренко // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. — 2017. — № 2. — С. 93–102. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-2-93-102.
6. Yu-Chung Tsao A multi-objective mixed robust possibilistic flexible programming approach for sustainable seaport-dry port network design under an uncertain environment / Yu-Chung Tsao, Vo-Van Thanh // *Transportation Research. Part E: Logistics and Transportation Review*. — 2019. — Vol. 124. — Pp. 13–39.
7. Douma A. M. Design and evaluation of a simulation game to introduce a Multi-Agent system for barge handling in a seaport / A. M. Douma, J. Van Hillegersberg, P. C. Schuur // *Decision Support Systems*. — 2012. — Vol. 53. — Is. 3. — Pp. 465–472.
8. Кузнецов А. Л. Имитационное моделирование как инструмент расчета наземных контейнерных терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. С. Ткаченко, Г. Б. Попов // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. — 2018. — № 1. — С. 100–108. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-1-100-108.
9. Port development. A handbook for planners in developing countries. — New York: UNCTAD, 1985. — 228 p.
10. Ricci A. On the reliability of the 3D steady RANS approach in predicting microscale wind conditions in seaport areas: The case of the IJmuiden sea lock / A. Ricci, B. Blocken // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. — 2020. — Vol. 207. — P. 104437.

REFERENCES

1. Andreeva, L. A., Kuznecov, A. L., Sampiev, A. M. and Semenov, A. D. “Zadachi sovershenstvovaniya metodov tekhnologicheskogo proektirovaniya morskikh torgovykh portov v novykh usloviyakh.” *Transportnoe delo Rossii* 1 (2024): 164–166.
2. Kuznecov, A.L. and Pogodin, V.A. “O nesovershenstve normativnoj bazy tekhnologicheskogo proektirovaniya morskikh portov.” *Morskie porty Rossii* 6 (2017): 18.
3. Sampiev, A. M. “Primenenie metoda Monte-Karlo dlya ocenki effektivnosti ispol'zovaniya byudzheta rabocheho vremeni morskogo terminala.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 68–77. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-68-77.

4. Valkova, S.S. and Vasil'ev, Yu.I. "Metodika ocenki sklada morskogo porta metodami imitacionnogo modelirovaniya." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 485–498. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-485-498.
5. Kuznecov, A. L., Kirichenko, A. V., Pogodin, V. A. and SHCHerbakova-Slyusarenko, V. N. "Rol' imitacionnogo modelirovaniya v tekhnologicheskom proektirovanii i ocenke parametrov gruzovyh terminalov." *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* 2 (2017): 93–102. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-2-93-102.
6. Tsao, Yu-Chung, and Vo-Van Thanh. "A multi-objective mixed robust possibilistic flexible programming approach for sustainable seaport-dry port network design under an uncertain environment." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 124 (2019): 13–39.
7. Douma, A. M., Jos van Hillegersberg, and P. C. Schuur. "Design and evaluation of a simulation game to introduce a multi-agent system for barge handling in a seaport." *Decision support systems* 53.3 (2012): 465–472.
8. Kuznecov, A. L., Kirichenko, A. V., Tkachenko, A. S., Popov G. B. "Imitacionnoe modelirovanie kak instrument rascheta nazemnyh kontejnernyh terminalov." *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* 1 (2018): 100–108. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-1-100-108.
9. *Port development. A handbook for planners in developing countries.* New York: UNCTAD, 1985.
10. Ricci, A., and B. Blocken. "On the reliability of the 3D steady RANS approach in predicting microscale wind conditions in seaport areas: The case of the IJmuiden sea lock." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 207 (2020): 104437.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Кузнецов Александр Львович —

д. т. н, профессор,
ФГОБУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: thunder1950@yandex.ru

Чистотин Олег Александрович — руководитель
департамента «Стакеры, реклаймеры»

АО «НПО «Аконит»
160004, г. Вологда, м-н Верхний Посад,
Ударников, 34, 1-й этаж
e-mail: chistotin_oa@npoakonit.ru

Затолокина Марина Юрьевна —

аспирант
ФГОБУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: marina.zatolokina7@gmail.com

Kuznetsov Alexander Lvovitch —

HbDr, professor,
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya str, St. Petersburg, Russia, 198035
e-mail: thunder1950@yandex.ru

Chistotin Oleg Alexandrovich —
department chief

АО "NPO "Akoniit"
314 Udarnikov str, Vologda,
Russia, 160004
e-mail: chistotin_oa@npoakonit.ru

Zatolokina Marina Yuerjevna,

PhD student
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya str, St. Petersburg, Russia, 198035
e-mail: marina.zatolokina7@gmail.com

Статья поступила в редакцию 27 сентября 2024

Received: September 27, 2024

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-709-725

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS OF HYDROGEN TRANSPORTATION BY SEA TRANSPORT BASED ON THE CRITERION OF SPECIFIC LOADING CAPACITY

A. S. Reutskii¹, A. S. Buyanov², A. A. Butsanets³

¹ FAI «Russian Maritime Register of Shipping», St. Petersburg, Russian Federation

² JSC «CNIIMF», St. Petersburg, Russian Federation

³ Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The paper examines vessel designs and existing vessels for the transportation of hydrogen in its various aggregate states and chemically bound forms. The aim of the study is to determine the optimal method of transporting hydrogen by sea in terms of specific carrying capacity. The objective of the study was to establish the relationship between the size of the transported commercial batch of hydrogen (taking into account its form) and the technical and operational characteristics of the vessel for its transportation in relation to each of the possible methods of storing hydrogen on board. The approach used made it possible to determine the optimal options in terms of specific carrying capacity for the marine transportation of hydrogen on ships with a displacement of 25...80 thousand tons. It was determined that LPG gas carriers and chemical tankers for transporting ammonia and methanol, respectively, are optimal in terms of specific carrying capacity in the displacement range under consideration. Conceptual designs of vessels for transporting hydrogen in "pure" form (compressed or liquefied) have shown insignificant results. An intermediate position is occupied by the method of transporting hydrogen using liquid organic carriers.

Keywords: hydrogen, marine hydrogen transportation, compressed hydrogen, CGH_2 , liquid hydrogen, LH_2 , liquid organic hydrogen carriers, LOHC, dibenzyltoluene, DBT, ammonia NH_3 , methanol, CH_3OH .

For citation:

Reutskii Aleksandr S., Buyanov Aleksandr S., Butsanets Artem A. "Comparative analysis of methods of hydrogen transportation by sea transport based on the criterion of specific loading capacity" *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.5 (2024): 709–725.
DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-709-725.

УДК 65.66

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ТРАНСПОРТИРОВКИ ВОДОРОДА МОРСКИМ ТРАНСПОРТОМ ПО КРИТЕРИЮ УДЕЛЬНОЙ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ

А. С. Реуцкий¹, А. С. Буюнов², А. А. Буцанец³

¹ ФАУ «Российский морской регистр судоходства»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² АО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе рассмотрены проекты судов и существующие суда для перевозки водорода в различных его агрегатных состояниях и химически связанном виде. Целью исследования является определение оптимального с точки зрения удельной грузоподъемности способа транспортировки водорода морским транспортом. Задачей исследования является установление зависимости между размером перевозимой товарной партии водорода (с учетом его состояния) и технико-эксплуатационными характеристиками судна для его транспортировки применительно к каждому из возможных способов его хранения на борту. Обобщены и проанализированы материалы исследований отечественных и зарубежных ученых, а также профильных руководящих документов. Определены типоразмерные ряды транспортных судов для транспортировки водорода в разных агрегатных состояниях (сжатом, сжиженном) и в химически

связанных видах (в виде аммиака, метанола, жидких органических носителей), содержащие информацию об их эксплуатационных характеристиках: чистой грузоподъемности, грузовместимости, главных размерных и т. д. Определены оптимальные с точки зрения удельной провозной способности транспортной линии способы морской транспортировки водорода. Использованный подход позволил определить оптимальные с точки зрения удельной провозной способности варианты морской транспортировки водорода на судах водоизмещением 25...80 тыс. т. Определено, что оптимальными с точки зрения удельной грузоподъемности в рассматриваемом диапазоне водоизмещения являются газозовы LPG и танкеры-химозовы для транспортировки аммиака и метанола соответственно. Концептуальные проекты судов для транспортировки водорода в «чистом» виде (сжатым или сжиженным) показали самые скромные результаты. Промежуточное положение занимает способ транспортировки водорода при помощи жидких органических носителей.

Ключевые слова: водород, морская транспортировка водорода, сжатый водород, сжиженный водород, жидкие органические носители водорода, дибензилтолуол, аммиак, метанол.

Для цитирования:

Реуцкий А. С. Сравнительный анализ способов транспортировки водорода морским транспортом по критерию удельной грузоподъемности / А. С. Реуцкий, А. С. Буянов, А. А. Буцанец // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 5. — С. 709–725. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-709-725.

Введение (Introduction)

Стратегия ИМО направлена на сокращение выбросов парниковых газов энергетическими установками морских судов к 2050 г. в два раза. В этой связи активно обсуждаются вопросы снижения выбросов парниковых газов судовыми энергетическими установками [1], [2], использования альтернативных видов судового топлива [3], использования «зеленого» водорода в качестве топлива, а также рассматриваются технологические цепочки его производства и поставки [4]. Места производства «зеленого» водорода зачастую удалены от мест его потребления [5], что в перспективе создаст потребность в судах для его транспортировки. Несмотря на наличие публикаций на тему использования водорода в качестве топлива на морском транспорте [6] вопросы создания судов для его транспортировки, а также выбора оптимального способа его транспортировки водным транспортом остаются малоизученными.

При организации цепочки поставки водорода, включающей его транспортировку и хранение, может потребоваться неоднократное изменение его агрегатного состояния, в частности для увеличения плотности, продления срока хранения водорода или по иным причинам, продиктованным способом его производства или применения, транспортировки, партионности доставки и т. д. Водород не является исключением [7] и может транспортироваться и храниться в сжатом (*compressed gaseous hydrogen* — CGH₂), сжиженном (*liquid hydrogen* — LH₂) и химически связанном виде: в виде жидких органических носителей водорода [8] (*Liquid Organic Hydrogen Carriers* — ЛОНС), а также в виде аммиака (NH₃) и метанола (CH₃OH). При этом водород в различных агрегатных состояниях или связанных видах имеет разные характеристики и требует применения различных технических решений для безопасного и эффективного обращения с ним, что оказывает влияние на облик судна для его транспортировки.

При организации цепочки поставок продукта или сырья наиболее важную роль играет себестоимость транспортировки [9]. В отсутствии широкого распространения водорода как топлива оценить эту величину можно только при помощи расчетных технико-экономических моделей. Для принятия решения о способе транспортировки водорода в рамках таких моделей необходимо иметь представление об облике транспортных судов, перевозящих водород в различных агрегатных состояниях или связанных видах. Для адекватного сравнения различных типов судов-водородозов можно обратиться к величине их удельной грузоподъемности по водоизмещению, представляющей собой отношение массы перевозимого ими груза к их водоизмещению. Использование этой величины позволит выполнить сравнительный анализ провозной способности вариантов морской транспортировки водорода, что до сих пор остается малоизученной проблемой. Таким образом, целью исследования является определение оптимального с точки зрения удельной грузоподъемности способа транспортировки водорода морским транспортом.

История транспортировки аммиака и метанола водным транспортом насчитывает уже не одно десятилетие [3]. Перевозка водорода в сжиженном виде (LH_2) осуществляется на единственном в своем роде судне *Suiso Frontier*, а морская транспортировка водорода в сжатом (CGH_2) и в химически связанном виде $LOHC$ до сих пор не применялись. Для определения облика судов для перевозки водорода в виде аммиака и метанола достаточно обратиться к статистическим данным по уже существующим судам, а в случае сжиженного и сжатого водорода — к опыту концептуальных проектов, созданных в последние годы. Как показало ретроспективное исследование существующих и проектируемых судов для транспортировки водорода, использование статистической информации о них не дает возможности выполнить сравнение всех исследуемых технологий и не позволяет установить зависимость между размером товарной партии водорода и технико-эксплуатационными характеристиками судна для его перевозки. Таким образом, для части агрегатных состояний водорода отсутствуют готовые или масштабируемые технические решения для его транспортировки, что обуславливает необходимость определения типоразмерного ряда транспортных судов, предназначенных для транспортировки водорода в различных его агрегатных состояниях и связанных видах, а также определение нижней и верхней границы диапазона водоизмещения всех типов сравниваемых судов для транспортировки водорода и углекислого газа в целях их корректного сравнения.

Исследование состоит из двух частей: анализа спроектированных или построенных судов для транспортировки водорода в разных его агрегатных состояниях и химически связанных видах и сравнения их по критерию удельной грузоподъемности в рамках сопоставимых дедеветных групп.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Морская транспортировка водорода в сжатом виде (CGH_2)

Проекты судов для перевозки водорода в сжатом виде (CGH_2). Одним из способов «уплотнения» водорода является его сжатие. Сжатие водорода в сосуде под давлением в 100 бар позволяет повысить его плотность в 73 раза (с $0,08987 \text{ кг/м}^3$ до $6,59 \text{ кг/м}^3$); под давлением в 200 бар — в 154 раза (до $13,919 \text{ кг/м}^3$); под давлением в 300 бар — в 240 раз (до $21,6 \text{ кг/м}^3$). Мировым опытом подтверждается, что этот способ транспортировки может быть востребован. Так, в 2020 г. австралийская компания *Global Energy Ventures* анонсировала создание первого проекта судна CGH_2 , заключив соглашение с *ABS* на сопровождение процесса проектирования¹. Грузовая система судна H_2 Neo рассчитывается на внутреннее давление 250 бар, грузоподъемность составит 430 т водорода, при этом судно имеет типоразмер *Handymax* (рис. 1, а).

В декабре 2022 г. *ABS* было выдано принципиальное одобрение на этот проект, в настоящий момент идет разработка проектной документации и подготовка к строительству. За выбор судостроительного предприятия отвечает компания *Clarksons PLC* (Великобритания). Пропульсивный комплекс судна, состоящий из двухтопливных двигателей, приводящих в движение электродвигатели с двумя гребными винтами фиксированного шага, разрабатывает компания *Wärtsilä Marine Power*².

Концептуальный подход к определению размерного ряда транспортных судов для перевозки водорода в сжатом виде (CGH_2). Анализ научно-технической литературы показал, что в настоящее время существует лишь один концептуальный проект водородовоза H_2 Neo с напорной грузовой системой для транспортировки водорода в сжатом виде от компании *Provaris Energy*, но его характеристики не раскрываются, поэтому для формирования представления об особенностях судов данного типа необходимо обратиться к опыту проектирования подобных судов для природного газа. Проекты судов *CNG* выполняются с напорными газовыми баллонами, объединенными в каскеты (рис. 1, б). В исследовании [10] рассмотрены три основных типоразмера каскетов для хранения

¹ Design unveiled for world's 1st compressed hydrogen ship // Информационный портал Offshore-energy.biz. URL: <https://www.offshore-energy.biz/design-unveiled-for-worlds-1st-compressed-hydrogen-ship/> (дата обращения: 08.04.2024).

² Wärtsilä's decarbonisation focus emphasised with Approval-in-Principle for GEVs pilot hydrogen vessel // Официальный сайт компании Wärtsilä. URL: <https://www.wartsila.com/media/news/04-11-2021-wartsila-s-decarbonisation-focus-emphasised-with-approval-in-principle-for-gevs-pilot-hydrogen-vessel-3001446> (дата обращения: 08.04.2024).

газов под давлением в судовом исполнении, незначительно отличающихся объемом, линейными размерами и количеством баллонов в кассете, а также некоторыми характеристиками баллонов (толщиной стенки, диаметром трубы и др.).

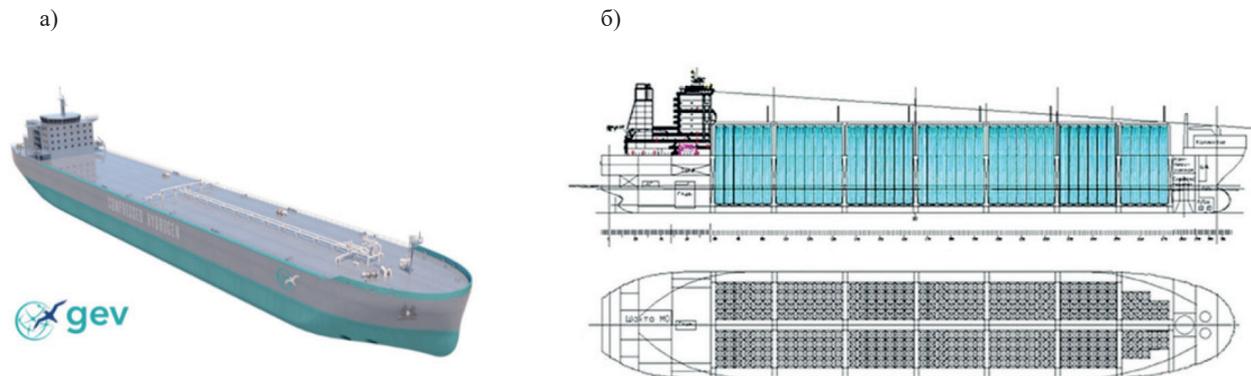


Рис. 1. Концептуальный проект судна CGH_2 проекта H_2Neo (а); схема размещения цилиндрических грузовых баллонов на CNG -судне при установке их в вертикальном положении (б)

В табл. 1 приведены габаритные размеры и массовые параметры кассеты и хранящегося в ней при давлении 200 бар водорода. Как видно из приведенных в таблице данных, массовая плотность данного способа хранения, т. е. отношение массы хранимого водорода к массе хранилища, составляет 1,21–2,36 %. При этом совокупный вес системы хранения и груза представляет собой значительную величину. Для того чтобы иметь упрощенное представление о размерениях судов для транспортировки водорода напорным способом в кассетах, необходимо представить массу кассет с водородом как полезную нагрузку для существующего типоряда распространенных транспортных судов. С учетом того, что при данном подходе будет известен вес груза и его условной тары (кассет с баллонами), следует выполнить сравнительный анализ, взяв за основу типоряд нефтяных танкеров, распределенных по дедвейтным группам. Нефтяные танкеры в данном случае наиболее удобны, так как для этих судов известна грузоподъемность, в отличие, например, от газозовозов, для которых обычно указывается объем грузовой системы. Необходимо особо отметить, что данный подход весьма условен и не учитывает вопросы мореходности CGH_2 судов (в первую очередь остойчивости), однако на ранних этапах технико-экономического исследования вопросы более общего плана превалируют над вопросами мореходных качеств, определение которых является предметом дальнейших исследований.

Таблица 1

Характеристики кассеты и хранящегося при давлении 200 бар водорода

Параметр	Тип кассеты		
	1	2	3
Внутренний объем баллона, м ³	28,90	53,26	27,28
Масса пустого баллона, т	31,32	57,36	29,78
Масса водорода в 1 баллоне, т	0,40	0,74	0,38
Количество баллонов в кассете, единиц	8	8	8
Масса кассеты с баллонами, т	270,56	495,5	257,24
Масса газа в кассете с баллонами*, т	3,22	5,93	3,04
Суммарная масса кассеты и газа, т	273,8	501,4	260,3

*Плотность водорода при давлении 200 бар и температуре 293,15 К составляет 13,91 кг/м³.

Величина полезной нагрузки для CGH_2 судов различных дедвейтных групп в зависимости от их типоразмера и давления внутри системы хранения представлена в табл. 2 и на рис. 2. В качестве прототипа кассет для грузовой системы выбран тип 1 — кассеты с наименьшим диаметром баллонов, выдерживающие наибольшее внутреннее давление.

Таблица 2

Главные размерения и массовые характеристики системы хранения водорода CGH_2 судов

Дедвейт*, т	Длина L_{bp} , м	Ширина B , м	Осадка в грузу d , м	Высота борта H , м	Водоизмещение Δ , т	Количество кассет, ед.	Масса грузовой системы с грузом, т	Полезная грузоподъемность по водороду**, т
20 000	154,0	23,0	8,5	12,7	26 000	68	18 618	219
30 000	168,0	29,0	9,5	14,0	38 000	102	27 928	328
40 000	174,0	32,2	11,0	17,3	52 000	137	37 511	441
50 000	175,0	32,2	12,9	18,4	62 500	172	47 094	554
75 000	219,0	32,2	13,6	19,8	83 000	240	65 712	772
100 000	238,0	43,0	13,5	19,8	120 000	347	95 009	1 117
115 000	239,0	44,0	14,8	21,0	135 000	399	109 246	1 284
150 000	264,0	50,0	16,0	23,2	177 000	520	142 376	1 673
193 000	274,0	50,0	19,6	28,0	230 000	677	185 363	2 179
280 000	319,0	60,0	20,4	28,8	325 000	982	268 872	3 160

* Здесь и далее в табл. 3–6 применена классификация судов согласно *PIANC*.

** Давление в системе 200 бар.

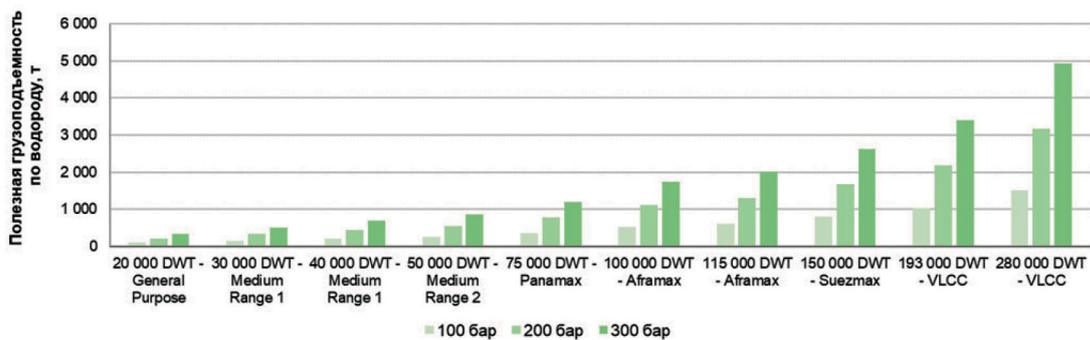
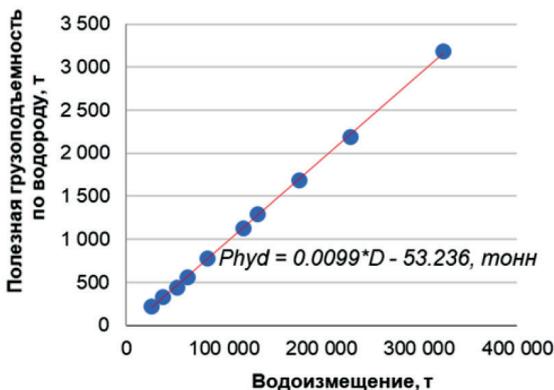


Рис. 2. Величина полезной нагрузки для судов CGH_2

Одним из возможных вариантов давления внутри системы хранения компримированного водорода является значение, не превышающее 200 бар. Эта величина, с одной стороны, приемлема с точки зрения безопасности при обращении с баллонами под давлением, а с другой — хорошо соотносится с давлением внутри подземных хранилищ водорода [11], что значительно упрощает процесс перегрузки из подземных хранилищ на суда при помощи трубопроводов высокого давления и дожимных компрессоров из-за минимальной разницы давлений в наземной и судовой системах.

а)



б)

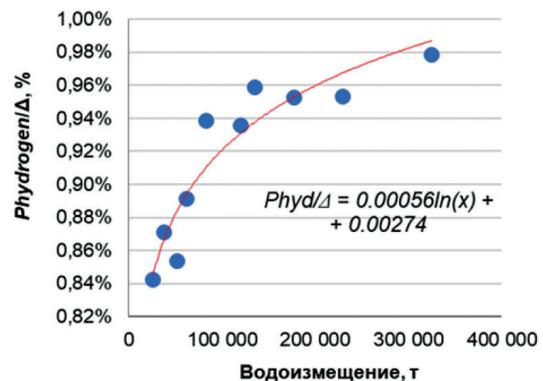


Рис. 3. Зависимость величины полезной нагрузки для CGH_2 судов от их водоизмещения (а), рост удельной грузоподъемности CGH_2 судов с увеличением их водоизмещения (б)

Таким образом, полезная грузоподъемность напорных судов для перевозки сжатого водорода при давлении 200 бар может быть описана как функция от их водоизмещения (рис. 3, а), а удельная грузоподъемность, т. е. отношение массы перевозимого водорода к водоизмещению транспортного судна, ожидаемо растет вместе с увеличением водоизмещения, как показано на рис. 3, б.

Морская транспортировка водорода в сжиженном виде (LH_2)

Проекты судов для перевозки водорода в сжиженном виде (LH_2). Первые опытно — конструкторские работы, посвященные созданию проектов морских судов LH_2 были выполнены достаточно давно. В исследовании 1998 г. [12] японские инженеры представили два концептуальных проекта судов для транспортировки водорода катамаранного типа (рис. 4), отличающихся исполнением грузовой системы. Суда спроектированы с самонесущими вкладными танками типа *B*, согласно классификации ИМО, при этом в одном проекте применялись грузовые танки цилиндрической формы (*MOSS*), а в другом — призматической формы (*IHI SPB*). Наибольшая длина судов составляет 345 м (*MOSS*) и 330 м (*IHI SPB*), длина между перпендикулярами — 330 м (*MOSS*) и 310 м (*IHI SPB*), ширина — 64 м (*MOSS*) и 56 м (*IHI SPB*), высота борта — 26 м (*MOSS*) и 24 м (*IHI SPB*), осадка — 14 м. Суммарная мощность энергетической установки составляет около 60 МВт, вместимость грузовой системы обусловлена производительностью наземной установки по производству водорода, а также параметрами транспортной системы (дальностью, скоростью хода судна и временем кругового рейса) и с учетом потерь груза в результате выкипания составляет 200 000 м³, или около 14 000 т водорода. Количество грузовых танков: четыре для проекта со сферическими грузовыми танками и два для проекта с призматическими грузовыми танками. Автономность и скорость судна обусловлены принятой в исследовании транспортной линией протяженностью 6 000 морских миль, а скорость судна в 20–25 уз необходима для преодоления этого расстояния за 10 сут. Применение катамаранного типа корпуса судна обусловлено необходимостью обеспечения требований к его остойчивости в сочетании с быстроходностью, большими главными размерениями и малой осадкой, обусловленной низкой плотностью перевозимого груза. Степень испарения груза (*Boill-off rate — BOR*) составляет 0,2...0,4 %.

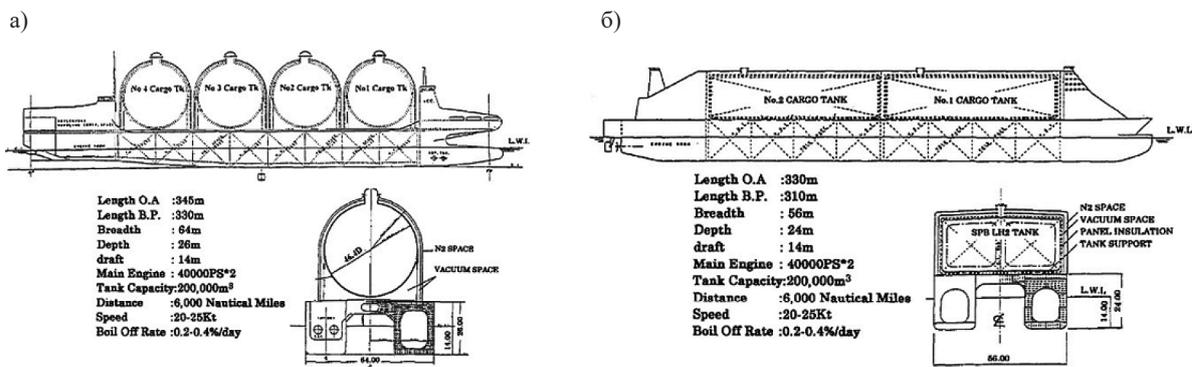


Рис. 4. Первые концептуальные проекты LH_2 японских специалистов:
а — со сферическими танками типа *MOSS*; б — с призматическими грузовыми танками

В данном проекте грузовые емкости теплоизолированы при помощи вспененных полиуретановых панелей (*PUF panel — polyurethane foam panel*) и вакуумированием объемов между теплоизоляцией и зашивкой грузовых танков. Также интересным решением является многофакторный подбор толщины изоляции в зависимости от *BOR* и мощности главных двигателей, использующих водород в качестве топлива (рис. 5).

После 1998 г. наблюдался длительный перерыв в разработке концептуальных проектов судов LH_2 , закончившийся в середине 2000-х гг. разработкой серии концептуальных проектов корпорации *Kawasaki Heavy Industries*, отмеченных в [13]. Длительная работа над ними привела к созданию проекта судна LH_2 вместимостью 160 000 м³, получившему в апреле 2022 г. принципиальное одобрение *ClassNK* (рис. 6, а). Его наибольшая длина 346 м, ширина 57 м, осадка 9,5 м, вмести-

мость грузовой системы с учетом потерь груза в результате его выкипания составляет 160 000 м³. Количество грузовых танков — четыре. В грузовых резервуарах используется недавно разработанная высокоэффективная система изоляции, которая сводит к минимуму испарение газа, однако дополнительных сведений о ней в открытых источниках нет. Энергетическая установка питается отпарным водородом и состоит из котла и паротурбинной установки. Кроме того, судно оборудовано системой подачи топливного водорода, включающей компрессоры для сжатия водорода, теплообменное и другое оборудование.

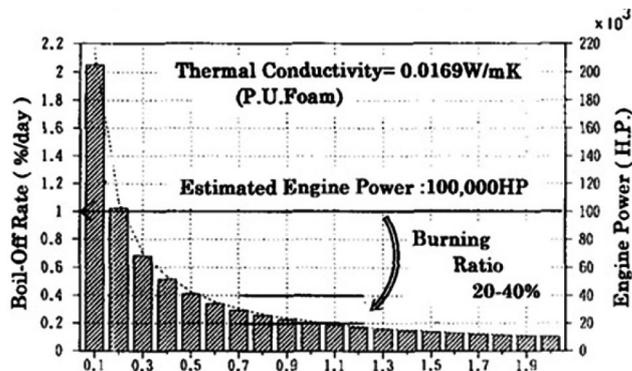


Рис. 5. Корреляция толщины теплоизоляции и степени испарения груза (BOR)

а)



б)



Рис. 6. Проект водородовоза LH₂ (Kawasaki Heavy Industries, Ltd.) (а) и проект бункеровщика LH₂ (Moss Maritime) (б)

В 2019 г. компании *Equinor, Wilhelmsen, DNV GL* и *Moss Maritime* презентовали совместно разработанный концептуальный проект бункеровщика сжиженным водородом (рис. 6, б). Его наибольшая длина составляет 137,0 м, ширина — 19,8 м. Суммарная мощность энергетической установки 6 МВт, грузоподъемность судна 9 000 м³ (2 × 4 500 м³), грузоподъемность 500 т. Количество грузовых танков: 2 танка типа С согласно классификации ИМО. Автономность судна составляет 20 000 морских миль, скорость — 15 уз.

Использование напорных самонесущих вкладных танков типа С, выдерживающих повышенное внутреннее давление до 5 бар, позволяет хранить испарившийся водород внутри грузового резервуара вместо его удаления для использования или повторной утилизации и принимать водород в грузовой танк без дополнительного охлаждения танков после выполнения балластного рейса. Примененный здесь грузовой танк представляет собой двустенный сосуд, работающий под давлением, при этом пространство между внутренним и внешним сосудом вакуумировано и заполнено внутри многослойной изоляцией (*Multi-Layer Insulation*), уменьшающей лучевой перенос тепла. На внешнюю оболочку дополнительно нанесена полиуретановая изоляция толщиной 300 мм, выступающая в качестве дополнительной меры для сохранения теплового баланса внутри грузового резервуара в случае потери вакуума в его межстенном пространстве. Снаружи грузовые резервуары

покрыты капом — экраном для защиты грузовых резервуаров от влаги и ультрафиолетовых лучей. Пространство между грузовыми резервуарами и защитным внешним капом заполнено азотом под давлением чуть выше 1 бар, состав атмосферы в этом пространстве подлежит постоянному контролю.

Еще один проект газовоза LH_2 представлен в исследовании [14], где дана подробная оценка его конструкции и примененных при его создании принципиальных решений. Газовоз спроектирован вокруг четырех цилиндрических танков объемом $\sim 280\,000\text{ м}^3$, отпарной газ из которых используется для судовых нужд. Судно имеет длину 370 м, ширину 75 м, осадку в грузу 10 м, оно способно перевозить 20 000 т водорода, при этом его водоизмещение составляет 232 000 т. Энергетическая установка состоит из нескольких газовых паротурбинных установок суммарной мощностью около 50 МВт. Давление паров груза в грузовой системе может быть повышено до 0,5 МПа, что оказывает значительное влияние на массу грузовых танков и определяет размеры и водоизмещение судна.

Наиболее инновационным и в некоторой мере футуристичным проектом газовоза LH_2 является *C-Job* (рис. 7), являющийся продуктом совместной деятельности компании *C-Job Naval Architects* и *LH₂ Europe*. В качестве источника энергии используются водородные топливные элементы. Наибольшая длина газовоза составляет 141,75 м, длина между перпендикулярами — 135,75 м, ширина — 34,90 м, осадка — 5,8 м, высота борта — 8,75 м. Суммарная мощность ЭУ составляет около 5 МВт, грузопместимость — $37\,500\text{ м}^3$ ($3 \times 12\,500\text{ м}^3$), скорость — 14 уз, а экипаж — 14 человек.



Рис. 7. Проект водородовоза LH_2 *C-Job*

1 февраля 2024 г. французский энергетический гигант *TotalEnergies* и компания *GTT*, получили принципиальное одобрение *Bureau Veritas* на концептуальный проект газовоза LH_2 грузопместимостью $150\,000\text{ м}^3$, оснащенного грузовой системой *GTT*, изготовленной по мембранной технологии³. К сожалению, больше информации ни о конструктиве судна, ни об его энергетической установке в открытом доступе не имеется.

Суда, предназначенные для перевозки водорода в сжиженном виде (LH_2). История транспортировки жидкого водорода водным транспортом началась еще в 60-х гг. XX в. Первый опыт транспортировки жидкого водорода на водном транспорте получило Национальное управление по авиации и исследованию космического пространства США (*NASA*), использующее жидкий водород в качестве топлива в своей космической программе *Space Shuttle* до самого ее закрытия в 2011 г. На рис. 8, а показан процесс буксировки баржи с установленной на ее палубе емкостью с жидким водородом. Несмотря на оригинальность технологии конструкция речного баржебуксирного состава исключает возможность использования ее в качестве прототипа для морских перевозок водорода.

³ TotalEnergies, GTT win BV's nod for large-scale LH2 carrier design // Информационный портал Offshore-energy.biz. URL: <https://www.offshore-energy.biz/totalenergies-gtt-win-bvs-nod-for-large-scale-lh2-carrier-design/> (дата обращения: 23.04.2024).

а)



б)

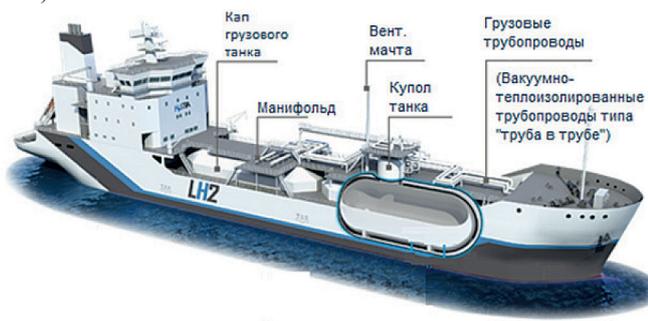


Рис. 8. Буксир *Clermont II*, доставляющий жидкий водород через систему каналов в космическом центре *NASA* «Стеннис» (а), газозов для транспортировки сжиженного водорода *Suiso Frontier* (б)

В отличие от технологии CGH_2 технология LH_2 уже успешно реализована в проекте *HySTRA*. В рамках этого проекта реализована цепочка поставок производимого из бурого угля водорода из Австралии в Японию. Основным элементом цепочки поставок является судно для перевозки LH_2 под названием *Suiso Frontier*⁴, спроектированное и построенное компанией *Kawasaki Heavy Industry* (Япония) под наблюдением *Class NK* (рис. 8, б).

Судно имеет длину 116 м, ширину 19 м, высоту борта 10,6 м и осадку 4,5 м. Численность экипажа составляет 25 человек, эксплуатационная скорость — 13 уз. Два грузовых танка имеют объем 1 250 м³, что эквивалентно около 88 т жидкого водорода. Особый интерес представляет собой грузовая система, выполненная в виде цилиндрических танков типа *C* (по классификации ИМО), оборудованных двустенной вакуумной криоизоляцией, что делает их, по сути, сосудами Дьюара, способными работать под избыточным давлением. Также судно имеет развитую балластную систему, позволяющую ему соответствовать требованиям к мореходности — в первую очередь к качке и устойчивости. Водород в качестве топлива на судне не используется, поэтому судовая энергетическая установка представлена тремя дизель-генераторами *Daihatsu 6DE-23* суммарной электрической мощностью 3 600 кВт, приводящими в движение два электрических гребных мотора суммарной мощностью 2 720 кВт, обеспечивающих вращение одного винта фиксированного шага, что позволяет судну развивать заявленную скорость в 13 уз. Также на судне имеется одно подруливающее устройство туннельного типа.

Концептуальный подход к определению размерного ряда транспортных судов для перевозки водорода в сжиженном виде (LH_2). Удельная грузоподъемность судов по водороду с грузовой системой, оборудованной танками типа *C* находится в пределах 1,24...8,68 %, у судов, оборудованных танками типа *B* (сферическими самонесущими типа *MOSS* или аналогичного конструктивного исполнения) — в диапазоне 6,56...12,55 %. Однако анализ параметров грузовых систем судов показал, что различный уровень проработки проектов оказывает значительное влияние на данную характеристику: чем детальнее проработан проект, тем «скромнее» значение удельной грузоподъемности. Для единственного существующего судна *Suiso Frontier* это значение составляет наименьшие 1,24 %, у детально проработанного проекта бункеровщика водородом от известной своим вкладом в развитие технологии морской транспортировки СПГ компании *MOSS Maritime* (Норвегия) оно составляет 5,33 %, в то время как у концептуального проекта — значительные 8,68 %. Из всех исследованных проектов только в проекте LH_2 *GTT* компании *GTT* (Франция) анонсировано применение мембранной технологии хранения водорода, однако дополнительных данных о характеристиках разрабатываемой системы в открытых источниках информации нет. Большинство газозовов *LNG* в настоящее время оборудованы мембранными системами компании *GTT*, что позволяет оценить удельную грузоподъемность водородозовов большого водоизмещения на основе имеющейся информации о существующих судах СПГ.

⁴ Hydrogen Supply Chain // Официальный сайт CO₂-free Hydrogen Energy Supply-chain Technology Research Association. URL: <https://www.hystra.or.jp/en/project> (дата обращения: 08.04.2024).

В процессе дальнейшего исследования LH_2 судов следует ввести следующую градацию вместимостей и удельных грузоподъемностей для концептуального типоряда судов:

– суда дедвейтом до 40 000 т (с грузовыми танками геометрической вместимостью до 75 000 м³) — оборудуются танками типа *C* и имеют показатель удельной грузоподъемности $Phydrogen/\Delta$, равный 1,24 %;

– суда дедвейтом от 40 000 до 80 000 т (с грузовыми танками геометрической вместимостью от 75 000 до 145 000 м³) — оборудуются танками типа *B* сферической формы и имеют показатель удельной грузоподъемности $Phydrogen/\Delta$, равный 5,33 %;

– суда дедвейтом от 80 000 до 98 000 т (с грузовыми танками геометрической вместимостью от 145 000 до 175 000 м³) — оборудуются танками типа *B* сферической формы и имеют показатель удельной грузоподъемности $Phydrogen/\Delta$, равный 6,56 %;

– суда дедвейтом от 98 000 до 155 000 т (с грузовыми танками геометрической вместимостью от 175 000 до 267 000 м³) — оборудуются мембранными танками типа и имеют показатель удельной грузоподъемности $Phydrogen/\Delta$, равный 9,33 %.

Основные параметры вариантного ряда судов LH_2 представлены в табл. 3.

Таблица 3

Главные размеры и массовые характеристики систем хранения водорода LH_2 судов

Дедвейт, т	Длина Lbp , м	Ширина B , м	Осадка в грузу d , м	Высота борта, м	Водоизмещение Δ , т	Вместимость грузовых танков Q , м ³	Удельная грузоподъемность $Phyd/\Delta$, %	Полезная грузоподъемность по водороду*, т
11 000	140,0	28,0	7,7	16,0	20 000	19 000	1,24	248,0
40 000	211,0	35,0	10,0	22,5	58 000	75 000	1,24	719,2
70 000	260,0	47,2	11,8	26,5	105 000	130 000	5,33	5 596,5
80 000	274,0	48,0	12,3	26,5	114 000	145 000	5,33	6 076,2
90 000	275,0	45,6	12,5	26,0	125 000	160 000	6,56	8 200,0
98 000	284,0	46,4	12,8	26,5	135 000	175 000	6,56	8 856,0
107 000	303,0	50,0	12,5	27,0	150 000	211 000	9,33	13 995,0
120 000	304,0	50,0	13,6	27,0	165 000	216 000	9,33	15 394,5
130 000	332,0	53,8	12,2	27,0	179 000	261 000	9,33	16 700,7
155 000	333,0	55,0	13,7	27,0	206 000	267 000	9,33	19 219,8

*При атмосферном давлении и температуре $-253,1$ °С.

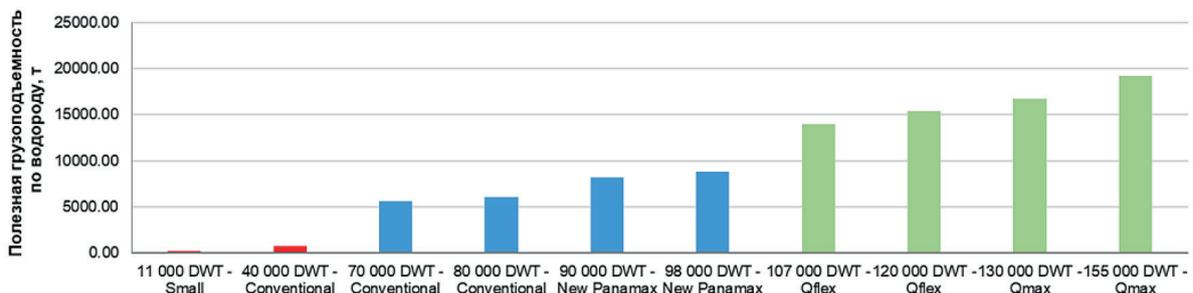


Рис. 9. Величина полезной нагрузки LH_2 судов (красный цвет — танки типа *C*, синий — танки типа *B* (Spherical-MOSS), зеленый — мембранный тип танков)

На рис. 9 приведены характеристики полезной грузоподъемности судов LH_2 по водороду в зависимости от их типоразмера и водоизмещения.

Морская транспортировка водорода в химически связанном виде при помощи жидких органических носителей (ЛОHC)

Жидкими органическими носителями водорода (ЛОHC) являются химические вещества, способные накапливать водород в своей структуре, хранить его в течение неограниченного количества

времени и контролируемо отдавать. Идеальный *ЛОНС* должен не только удерживать большое количество водорода, но и отвечать следующим требованиям: быть стабильной смесью, иметь быструю скорость реакции гидрирования/дегидрирования, иметь низкие показатели стоимости оборудования и энергозатрат на реакцию гидрирования / дегидрирования, быть безопасным, а также совместимым с существующими технологиями и существующей инфраструктурой [15]. Наиболее часто упоминаемыми в литературе *ЛОНС* являются: смесь бензола (C_6H_6) и циклогексана (C_6H_{12}), толуол (C_7H_8), нафталин ($C_{10}H_8$), *N*-этилкарбазол ($C_{14}H_{13}N$) и дибензилтолуол (DBT). В исследовании [16] авторы провели анализ этих веществ в соответствии с описанными характеристиками и определили в качестве наиболее перспективного носителя больших партий водорода дибензилтолуол (DBT).

В соответствии с паспортом вещества⁵ дибензилтолуол не является опасным веществом и требования Международного кодекса по опасным грузам (*IBC Code*) к нему неприменимы. Таким образом, учитывая его плотность ($1,035...1,045 \text{ т/м}^3$), в рамках данного исследования допустимо считать, что его перевозку можно производить с использованием наливных танкеров любых дедейтных групп. Согласно исследованию [16], отношение массы хранимого водорода к массе жидкости-носителя (дибензилтолуол — *H18-DBT*) составляет $0,0575 : 1$. Это позволяет найти соотношение требуемой грузоподъемности судна по жидким органическим носителям к его полезной грузоподъемности по водороду (табл. 4, рис. 10).

Таблица 4

Главные размерения и полезная грузоподъемность по водороду для различных типов нефтяных танкеров для перевозки жидких органических носителей водорода (DBT)

Дедейт, т	Длина <i>Lbp</i> , м	Ширина, <i>B</i> , м	Осадка в грузу, <i>d</i> , м	Высота борта, м	Водоизмещение Δ , т	Вместимость грузовых танков Q , м ³	Полезная грузоподъемность по водороду, т	Удельная грузоподъемность $Phyd/\Delta$, %
20 000	154,0	23,0	8,5	12,7	26 000	18 500	1 064	4,09
30 000	168,0	29,0	9,5	14,0	38 000	28 000	1 610	4,24
40 000	174,0	32,2	11,0	17,3	52 000	37 500	2 156	4,15
50 000	175,0	32,2	12,9	18,4	62 500	47 000	2 703	4,32
70 000	219,0	32,2	13,6	19,8	83 000	65 800	3 784	4,56
100 000	238,0	43,0	13,5	19,8	120 000	95 000	5 463	4,55
115 000	239,0	44,0	14,8	21,0	135 000	109 300	6 285	4,66
150 000	264,0	50,0	16,0	23,2	177 000	142 500	8 194	4,63
193 000	274,0	50,0	19,6	28,0	230 000	185 300	10 655	4,63
280 000	319,0	60,0	20,4	28,8	325 000	268 800	15 456	4,76

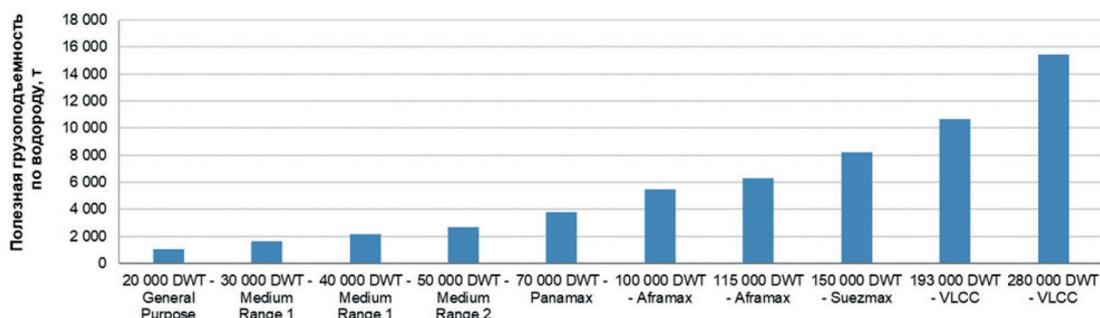


Рис. 10. Величина полезной нагрузки наливных танкеров для перевозки водорода в виде *ЛОНС*

Морская транспортировка водорода в виде аммиака (NH_3)

Транспортировка аммиака осуществляется газозовами *LPG*. Транспортировка аммиака в целевой порт осуществляется в сжиженном состоянии и близком к атмосферному давлению, при этом

⁵ Паспорт безопасности. Дибензилтолуол. URL: <https://h2-industries.com/wp-content/uploads/2020/10/Safety-Data-Sheet-Dibenzyltoluene.pdf>

выполняется его дополнительное охлаждение ниже его температуры кипения ($-33,4^{\circ}\text{C}$). Обусловлено это экономическими факторами, поскольку при сжижении аммиака его объем уменьшается более чем в 800 раз. Относительно низкое давление конденсации аммиака позволяет перевозить его на всех типах газозовов *LPG*.

Циркуляция по процессу Габера – Боша позволяет получать аммиак со 100 % выходом при среднем расходе электроэнергии $\sim 3\,200$ кВт · ч [16]. При этом для получения 0,1563 кг водорода необходим 1 кг NH_3 . Таким образом, можно определить фактическую вместимость по аммиаку *LPG* газозовов и соответствующую ей полезную грузоподъемность по водороду для типоразмерной линейки *LPG* газозовов всех дедеветных групп (табл. 5, рис. 11).

Таблица 5

Главные размерения и полезная грузоподъемность по водороду для различных типов *LPG* газозовов для перевозки аммиака

Дедевет*, т	Длина <i>Lbp</i> , м	Ширина <i>B</i> , м	Осадка в грузу <i>d</i> , м	Высота борта, м	Водоизмещение Δ , т	Вместимость грузовых танков Q , м ³	Полезная грузоподъемность по водороду*, т	Удельная грузоподъемность $Phyd/\Delta$, %
10 000	112,0	19,8	8,8	11,2	16 000	12 000	1 278	7,99
22 000	152,0	25,6	10,9	16,4	33 000	22 000	2 343	7,10
30 000	172,0	29,4	10,4	18,0	42 000	37 000	3 941	9,38
43 000	195,0	32,2	11,9	20,8	60 000	59 000	6 284	10,47
50 000	219,0	36,6	10,9	20,4	69 000	73 000	7 775	11,27
64 000	217,0	36,0	13,6	22,6	85 000	90 000	9 585	11,28

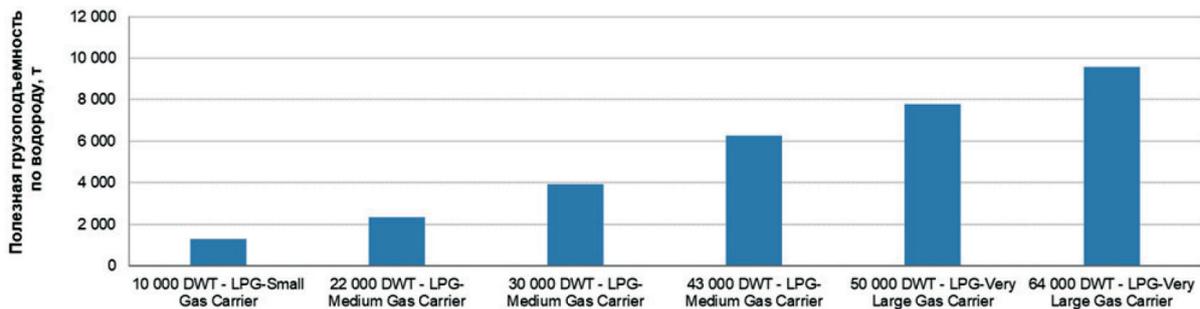


Рис. 11. Величина полезной нагрузки по водороду *LPG* газозовов для перевозки аммиака

Морская транспортировка водорода в виде метанола (CH_3OH)

Транспортировка метанола осуществляется танкерами-химовозами, т. е. наливными судами, построенными или приспособленными для перевозки опасных химических грузов наливом. Согласно Международному Кодексу постройки и оборудования судов, перевозящих опасные химические грузы наливом (*IBC Code*) [17], метанол относится к вредным веществам категории *Y* [17], [18] и должен перевозиться на танкерах-химовозах типа 3. Согласно определению из [17], это танкер-химовоз, предназначенный для перевозки продуктов, представляющих достаточно серьезную угрозу для окружающей среды и безопасности, на котором необходимо принятие мер в небольших масштабах по повышению живучести судна в поврежденном состоянии.

Транспортировка метанола из отгрузочных терминалов до потребителя осуществляется судами типа химовоз-продуктовоз. Химовоз-продуктовоз — это наливное судно, построенное или приспособленное для перевозки опасных химических грузов наливом. Согласно исследованию [16], отношение массы хранимого водорода к массе метанола составляет 0,111 : 1. Это позволяет найти соотношение требуемой грузоподъемности судна по метанолу к его полезной грузоподъемности по водороду (табл. 6, рис. 12).

Таблица 6

Главные размерения и полезная грузоподъемность по водороду для различных типов танкеров-химовозов для перевозки метанола

Дедвейт*, т	Длина L_{bp} , м	Ширина B , м	Осадка в грузу, d , м	Высота борта, м	Водоизмещение Δ , т	Вместимость грузовых танков Q , м ³	Полезная грузоподъемность по водороду*, т	Удельная грузоподъемность P_{hyd}/Δ , %
20 000	154,0	23,0	8,5	12,70	26 000	18 500	2 054	7,90
30 000	168,0	29,0	9,5	14,00	38 000	28 000	3 108	8,18
40 000	174,0	32,0	11,0	17,30	52 000	37 500	4 163	8,00
50 000	175,0	32,2	12,9	18,40	62 500	47 000	5 217	8,35
70 000	219,0	32,2	13,6	19,80	83 000	65 800	7 304	8,80
100 000	238,0	43,0	13,5	19,80	120 000	95 000	10 545	8,79
115 000	239,0	44,0	14,8	21,00	135 000	109 300	12 132	8,99

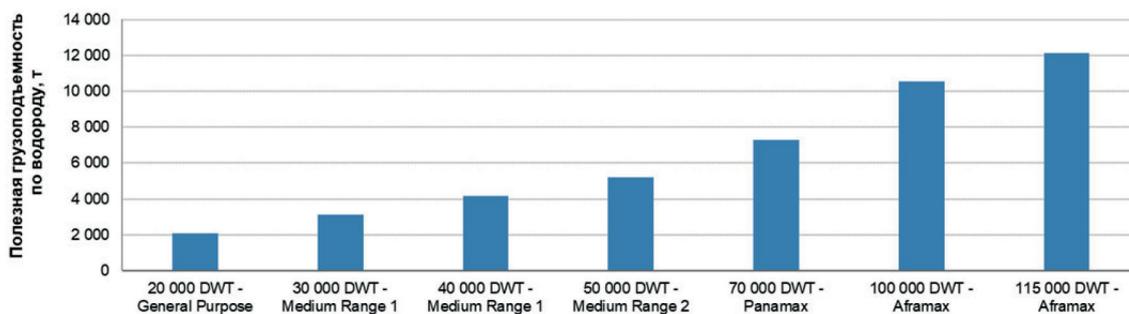


Рис. 12. Величина полезной нагрузки по водороду танкеров-химовозов для перевозки метанола

Определение оптимального с точки зрения удельной грузоподъемности способа транспортировки водорода морским транспортом

Данная проблема решается при помощи установления зависимости между размером перевозимой товарной партии водорода с учетом его специфических свойств и технико-эксплуатационными характеристиками судна для его транспортировки применительно к каждому из возможных способов его хранения на борту. Проведенное ретроспективное исследование показало, что для транспортировки водорода могут быть использованы различных типов судов, имеющие собственные конструктивные и технологические особенности. В целях их корректного сравнения необходимо определить сравниваемый диапазон водоизмещения этих судов. Например, *ЛОХС* могут перевозиться в обычных нефтяных танкерах, водоизмещение которых на мировой рынке составляет более 300 тыс. т, в то время как водоизмещение *LPG* газовозов, используемых для транспортировки сжиженного аммиака, редко превышает 80 тыс. т. Что касается концептуальных проектов судов для перевозки чистого водорода в сжатом или сжиженном виде, то в силу отсутствия какой-либо статистической выборки верхнюю границу вместимости этих типов судов определить в данный момент невозможно. Таким образом, в целях исследования необходимо ограничить рассматриваемый диапазон водоизмещения тем диапазоном, в котором возможно сравнение всех типов судов, т. е. от 25 до 80 тыс. т (рис. 13).

Таким образом, способы транспортировки водорода морским транспортом могут быть ранжированы по критерию уменьшения удельной грузоподъемности по водороду следующим образом:

- 1) газовоз *LPG* (аммиак — NH_3) — P_{hyd}/Δ составляет 7,99–11,28 %;
- 2) танкер-химовоз (метанол — CH_3OH) — P_{hyd}/Δ составляет 7,9–8,8 %;
- 3) нефтяной танкер (жидкий органический носитель — дибензинтолуол (DBT) — P_{hyd}/Δ составляет 4,09–4,56 %;

4) газозов для транспортировки водорода в сжиженном виде (LH_2) — P_{hyd}/Δ составляет 1,24–5,33 %;

5) газозов для транспортировки водорода в сжатом виде (CGH_2) — P_{hyd}/Δ составляет от 0,84 до 0,89 %.

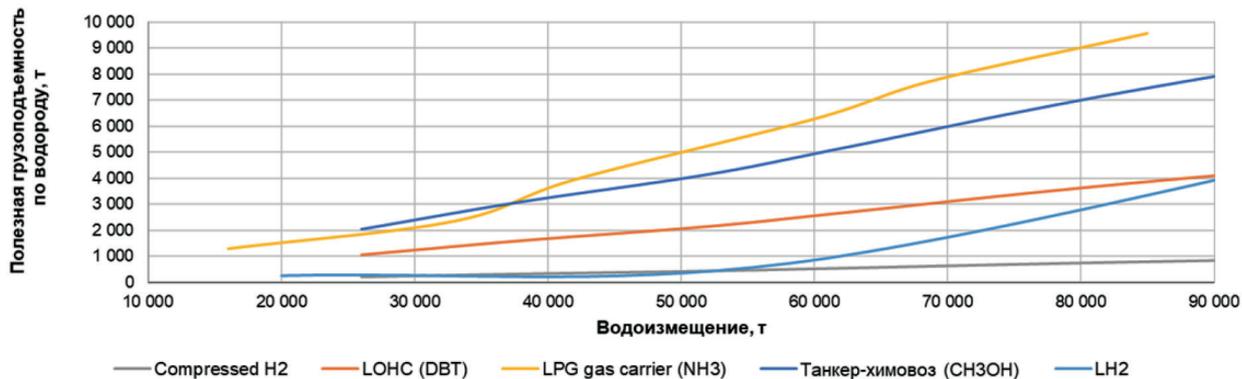


Рис. 13. Графики зависимости полезной грузоподъемности судов от их водоизмещения применительно к различным способам транспортировки водорода: CGH_2 , LH_2 , LOHC (DBT), NH_3 и CH_3OH

Представленную на рис. 13 графическую информацию можно интерпретировать следующим образом:

- полезная грузоподъемность по водороду судов рассматриваемого диапазона водоизмещения (до 80 тыс. т) не превышает 9 000 т;
- полезная грузоподъемность по водороду судов рассматриваемого диапазона водоизмещения (до 80 тыс. т), перевозящих его в «чистом» виде и в связанном с жидким органическим носителем виде, не превышает 3 000 т;
- при размере товарной партии водорода более 3 000 т и наличии ограничений на главные размерения транспортного судна, лимитирующих его водоизмещение вплоть до 80 тыс. т, транспортировку аммиака или метанола необходимо осуществлять в химически связанном виде на судах соответствующих типов;
- при размере товарной партии водорода до 500 т ее можно перевозить на судах LH_2 и CGH_2 , при этом суда этих типов будут иметь одинаковое водоизмещение вплоть до 50–54 тыс. т;
- в диапазоне водоизмещения 25–37 тыс. т танкеры-химовозы для транспортировки водорода в виде метанола демонстрируют наилучшие показатели удельной грузоподъемности, при значении водоизмещения более 37 тыс. т их сменяют суда-газовозы для транспортировки водорода в виде аммиака;
- при необходимости транспортировки товарной партии водорода более 9 000–10 000 тыс. т использование газозовов LPG для транспортировки водорода в виде аммиака невозможно в силу отсутствия на фрахтовом рынке судов достаточного водоизмещения.

Заключение (Conclusion)

В работе рассмотрены проекты судов и существующие суда для перевозки водорода в различных его агрегатных состояниях и химически связанном виде. Определение зависимости между размером перевозимой товарной партии водорода с учетом его специфических свойств и технико-эксплуатационными характеристиками судна для его транспортировки применительно к каждому из возможных способов его хранения на борту позволило найти оптимальный с точки зрения удельной грузоподъемности способ транспортировки водорода морским транспортом транспортными судами, имеющими водоизмещение в диапазоне 25...80 тыс. т. Оптимальными с точки зрения удельной грузоподъемности в рассматриваемом диапазоне водоизмещения являются газозовы LPG и танкеры-химовозы для транспортировки аммиака и метанола соответственно.

Концептуальные проекты судов для транспортировки водорода в «чистом» (сжатом или сжиженном) виде показали самые скромные результаты. Промежуточное положение занимает способ транспортировки водорода при помощи жидких органических носителей. Полученные результаты могут быть использованы при решении задач определения себестоимости транспортировки водорода в зависимости от его агрегатного состояния и используемого судна, т. е. могут быть полезны как на ранних этапах экономических исследований, так и в рамках предпроектной проработки концепта судна для транспортировки водорода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буянов А. С. Формирование методологического подхода к процессу определения углеродного следа транспортной услуги с использованием коэффициентов энергоэффективности судна / А. С. Буянов, А. С. Реуцкий // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 70/71. — С. 13–28.
2. Буянов А. С. Коэффициент энергоэффективности как инструмент определения углеродного следа от работы морских судов ледовых классов / А. С. Буянов, В. В. Якимов, А. С. Реуцкий // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № . 72/73. — С. 21–31.
3. Буянов А. С. Анализ опыта применения метанола и этанола в качестве топлива на судах / А. С. Буянов, О. Н. Леонова, А. С. Реуцкий // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2021. — № 64/65. — С. 91–97.
4. Heid B. Five charts on hydrogen's role in a net-zero future McKinsey & Company.[Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/five-charts-on-hydrogens-role-in-a-net-zero-future> (дата обращения 20.09.2023).
5. Berger R. Prosperity at Risk: For a New Strategy in Energy Policy / R. Berger et al. — 2022. — Pp. 1–7.
6. Di Lullo G. Large-scale long-distance land-based hydrogen transportation systems: A comparative techno-economic and greenhouse gas emission assessment / G. Di Lullo et al. //International Journal of Hydrogen Energy. — 2022. — Vol. 47. — Is. 83. — Pp. 35293–35319.
7. Шамрай Ф. А. Доступные сегодня технологии хранения и транспортировки водорода. / Ф. А. Шамрай // Деловой журнал NEFTEGAZ. RU. — 2022. — № 1(121). — С. 50–55.
8. Макарян И. А. Хранение водорода с использованием жидких органических носителей (обзор) / И. А. Макарян, И. В. Седов, А. Л. Максимов // Журнал прикладной химии. — 2020. — Т. 93. — № . 12. — С. 1716–1733.
9. Буянов А. С. Методы оценки стоимости перевозки грузов морским транспортом в условиях ограниченного информационного обеспечения / А. С. Буянов // Транспорт Российской Федерации. — № 3 (94). — 2021. — С. 22–27.
10. Власьев М. В. Формирование морской транспортно-технологической системы перевозки сжатого природного газа (CNG-технология) / М. В. Власьев, Г. Ф. Демешко // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2018. — Спец. вып. 2. — С. 160–168.
11. Сафарова Е. А. Особенности эксплуатации объектов подземного хранения газа при совместном хранении метана и водорода / Е. А. Сафарова, Д. С. Филиппова, В. Е. Столяров // Научный журнал Российского газового общества. — 2021. — № . 3. — С. 58–63.
12. Abe A. Studies of the large scale transportation of the liquid Hydrogen / A. Abe // Proceedings of the 11th World Hydrogen Energy Conference. — 1996. — Vol. 2. — С. 1145–1154.
13. Kamiya S., Study on introduction of CO₂ free energy to Japan with liquid hydrogen / S. Kamiya, M. Nishimura, E. Harada // Physics Procedia. — 2015. — Т. 67. — С. 11–19.
14. Alkhaledi A. N. A hydrogen fuelled LH₂ tanker ship design / A. N. Alkhaledi, S. Sampath, P. Pilidis // Ships and Offshore Structures. — 2022. — Vol. 17. — Is. 7. — Pp. 1555–1564.
15. Modisha P. M. The prospect of hydrogen storage using liquid organic hydrogen carriers / P. M. Modisha et al. // Energy & fuels. — 2019. — Vol. 33. — Is. 4. — Pp. 2778–2796.
16. Abdin Z. Large-scale stationary hydrogen storage via liquid organic hydrogen carriers / Z. Abdin et al. // Iscience. — 2021. — Vol. 24. — Is. 9. — Pp. 1–23.
17. Международный Кодекс постройки и оборудования судов, перевозящих опасные химические грузы наливом (Кодекс МКХ). — СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 1997. — 463 с.

18. Международная Конвенция по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ 73/78). Приложение II: Правила предотвращения загрязнения вредными веществами, перевозимыми наливом. — СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2017. — 824 с.

REFERENCES

1. Buyanov, A. S., Reuckij, A. S. “Formirovanie metodologicheskogo podhoda k processu opredeleniya uglerodnogo sleda transportnoj uslugi s ispol’zovaniem koefficientov energoeffektivnosti sudna.” *Nauchno-tekhnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva* 70/71 (2023): 13–28.
2. Buyanov, A. S., YAkimov, V. V., Reuckij, A. S. “Koefficient energoeffektivnosti kak instrumentopredeleniya uglerodnogo sleda ot raboty morskikh sudov ledovyh klassov.” *Nauchno-tekhnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva* 72/73 (2023): 21–31.
3. Buyanov, A. S., Leonova, O. N., Reuckij, A. S. “Analiz opyta primeneniya metanola i etanola v kachestve topliva na sudah.” *Nauchno-tekhnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva* 64/65 (2021): 91–97.
4. Heid B. et al Five charts on hydrogen’s role in a net-zero future McKinsey & Company. Web. 20 Sept. 2023 <<https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/five-charts-on-hydrogens-role-in-a-net-zero-future>>.
5. Berger R Prosperity at Risk: For a New Strategy in Energy Policy / R. Berger et al. (2022): 1–7.
6. Di Lullo, Giovanni, et al. “Large-scale long-distance land-based hydrogen transportation systems: A comparative techno-economic and greenhouse gas emission assessment.” *International Journal of Hydrogen Energy* 47.83 (2022): 35293–35319.
7. SHamraj F. A. “Dostupnye segodnya tekhnologii hraneniya i transportirovki vodoroda.” *Delovoj zhurnal NEFTEGAZ.RU* 11 (2022): 50–55.
8. Makaryan, I. A., Sedov, I. V., Maksimov, A. L. “Hranenie vodoroda s ispol’zovaniem zhidkikh organicheskikh nositelej (obzor).” *ZHurnal prikladnoj himii* 93.12 (2020): 1716–1733.
9. Buyanov, A. S. “Metody ocenki stoimosti perevozki gruzov morskim transportom v usloviyah ogranichenogo informacionnogo obespecheniya.” *Transport Rossijskoj Federacii* 3(94) (2021): 22–27.
10. Vlas’ev, M. V., Demeshko, G. F. “Formirovanie morskoy transportno-tekhnologicheskoy sistemy perevozki szhatogo prirodno gaza (CNG-tekhnologiya).” *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra* Spec. vyp. 2 (2018): 160–168.
11. Safarova, E. A., Filippova, D. S., Stolyarov, V. E. “Osobennosti ekspluatatsii ob’ektov podzemnogo hraneniya gaza pri sovmestnom hranenii metana i vodoroda.” *Nauchnyj zhurnal Rossijskogo gazovogo obshchestva* 3 (2021): 58–63.
12. Abe, A. “Studies of the large scale transportation of the liquid Hydrogen.” *Proceedings of the 11th World Hydrogen Energy Conference* 2 (1996): 1145–1154.
13. Kamiya, S., Nishimura, M., Harada, E. “Study on introduction of CO₂ free energy to Japan with liquid hydrogen.” *Physics Procedia* 67 (2015): 11–19.
14. Alkhaledi, A. N., Sampath, S., Pilidis, P. “A hydrogen fuelled LH₂ tanker ship design.” *Ships and Offshore Structures* 17.7 (2022): 1555–1564.
15. Modisha, P. M. et al “The prospect of hydrogen storage using liquid organic hydrogen carriers.” *Energy & fuels* 33.4 (2019): 2778–2796.
16. Abdin Z. “Large-scale stationary hydrogen storage via liquid organic hydrogen carriers.” *Iscience* 24.9 (2021): 1–23.
17. *Mezhdunarodnyj Kodeks postrojki i oborudovaniya sudov, perevozyashchih opasnye himicheskie gruzy nalivom (Kodeks MKKH)*. SPb.: ZAO «CNIIMF», 1997.
18. *Mezhdunarodnaya Konvenciya po predotvrashcheniyu zagryazneniya s sudov (MARPOL 73/78). Prilozhenie II: Pravila predotvrashcheniya zagryazneniya vrednymi veshchestvami, perevozimymi nalivom*. SPb.: AO «CNIIMF», 2017.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Реуцкий Александр Сергеевич —
кандидат технических наук, старший эксперт
ФАУ «Российский морской регистр судоходства»
191181, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Миллионная, д. 7, литера А
e-mail: reutskii.as@rs-class.org

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Reutskii Aleksandr Sergeevich —
PhD, Senior Expert
FAI «Russian Maritime Register of Shipping»
7-A, Millionnaya str., Saint-Petersburg, 191181,
Russian Federation
e-mail: reutskii.as@rs-class.org

Буянов Александр Сергеевич —
кандидат экономических наук,
заместитель генерального директора
АО «ЦНИИМФ»
191015, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Кавалергардская улица, д. 6, лит. А
e-mail: buyanovas@cniimf.ru

Буцанец Артем Александрович —
кандидат технических наук, начальник отдела
НТИ и ИС
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: butsanetsaa@gumrf.ru

Buyanov Aleksandr Sergeevich —
PhD,
Deputy Director General
JSC “CNIIMF”
191015, Russian Federation, Saint Petersburg,
Kavalergarskaya street, 6, lit. A
e-mail: buyanovas@cniimf.ru
Butsanets, Artem A. —
PhD,
Head of the Department
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: butsanetsaa@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 25 сентября 2024
Received: September 25, 2024

SUMMARY OF THE RESULTS OF FIELD AND LABORATORY STUDIES OF HYDRAULIC RESISTANCE DURING CHANNEL BENDING

M. V. Zhuravlev, G. L. Gladkov, P. V. Belyakov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The reliability of channel forecasts, performed using mathematical modeling methods in the design of engineering activities on shipping rivers, largely depends on the accuracy of the assessment of hydraulic resistance and sediment transport parameters. Therefore, the hydraulic resistance of natural channels is one of the largest problems in the dynamics of channel flows and is the object of close attention of scientists. In the resistance of natural channels, roughness appears in three forms: the first of them is the roughness of the granular surface of the bottom; the second is the roughness created by boulders and the third type is the roughness of microforms: ripples and ridges. Channel mesoforms also contribute to the resistance to water movement: spits, side streams, middle streams, islands, bends of the channel and such complex formations as riffles. This type of resistance is usually called the resistance of the channel form. The resistance of the natural channel shape due to the movement and deformation of mesoforms can change significantly over time. The complexity and insufficient study of this issue significantly limit the possibilities of a theoretical approach to its solution. Therefore, the obtained results are mainly empirical or semi-empirical in nature. The paper presents the results of experimental and field studies that allowed us to identify the main features of flow movement in winding sections of rivers. One of the features of flow movement at channel turns is the possibility of additional energy losses. The total resistance of a curved section of a channel is made up of three main parts: the resistance of the granular surface of the bottom, the resistance of the bottom ridges, and the resistance of the channel shape. The additional resistance created by the bend depends on the curvature of the channel, the rate of change in depth along the length of the bend, and also reflects the impact of side streams formed near the convex bank on the flow.

Keywords: channel, river flow, channel bend, hydraulic resistance, energy loss, bottom roughness, flow velocity, roughness coefficient.

For citation:

Zhuravlev, Michael V., Gladkov, Gennadii L. and Belyakov, Pachom V. "Summary of the results of field and laboratory studies of hydraulic resistance during channel bending." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.5 (2024): 726–737. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-726-737.

УДК 556.536

ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАТУРНЫХ И ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ НА ИЗГИБЕ РУСЛА

М. В. Журавлев, Г. Л. Гладков, П. В. Беляков

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Темой исследования является анализ надежности русловых прогнозов, выполняемых с использованием методов математического моделирования при проектировании инженерных мероприятий на судоходных реках, который в значительной степени зависит от точности оценки гидравлического сопротивления и параметров транспорта наносов. В работе отмечается, что гидравлическое сопротивление естественных русел является одной из основных проблем динамики русловых потоков и объектом пристального внимания ученых. Акцентируется внимание на том, что сопротивление естественных русел шероховатости выступает в трех видах: первый — это шероховатость зернистой поверхности дна; второй — шероховатость, создаваемая валунами; третий — шероховатость микроформ: рифелей и гряд. Также подчеркивается, что влияние на сопротивление движению воды оказывают русловые мезоформы: косы, побочни,

осередки, острова, изгибы русла и такие сложные образования, как перекаты. Этот вид сопротивления, обычно называемый сопротивлением формы русла, в связи с перемещением и деформациями мезоформ может заметно изменяться во времени. Обращается внимание на то, что сложность и недостаточная изученность этого вопроса существенным образом ограничивают возможности теоретического подхода к его решению. Поэтому полученные результаты носят в основном эмпирический или полуэмпирический характер. В работе приведены результаты экспериментальных и натурных исследований, позволяющих выявить основные особенности движения потока на извилистых участках рек. Рассмотрена одна из особенностей движения потока на поворотах русла, такая как возможность появления дополнительных потерь энергии. Проанализировано суммарное сопротивление изогнутого участка русла, состоящее из трех основных частей: сопротивления зернистой поверхности дна, сопротивления донных гряд и сопротивления формы русла. Сделан вывод о том, что добавочное сопротивление, создаваемое изгибом, зависит от кривизны русла, быстроты изменения глубин по длине извилины, а также отражает воздействие на поток побочней, формирующихся у выпуклого берега.

Ключевые слова: русло, речной поток, изгиб русла, гидравлическое сопротивление, потеря энергии, шероховатость дна, скорость течения, коэффициент шероховатости.

Для цитирования:

Журавлев М. В. Обобщение результатов натурных и лабораторных исследований гидравлических сопротивлений на изгибе русла / М. В. Журавлев, Г. Л. Гладков, П. В. Беляков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 5. — С. 726–737. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-726-737.

Введение (Introduction)

В естественных речных потоках процессы превращения механической энергии в теплоту, перемещения наносов и деформаций русел составляют единое целое. Учитывая, что транспорт наносов и гидравлическое сопротивление в реках взаимосвязаны, дальнейшее совершенствование моделей транспорта наносов невозможно без оценки величины гидравлического сопротивления русла [1]. Современный уровень развития динамики русловых потоков [2] требует рассматривать речной поток и подвижное русло как единую систему, взаимодействие в которой осуществляется по принципу обратной связи (поток ↔ русло). При этом поток сам создает и регулирует шероховатость своего дна. В естественных руслах сопротивление движению воды создается группой факторов: зернистой шероховатостью дна, донными волнами (грядами и рифелями), русловыми формами (побочнями, осередками, изгибами русла), водной растительностью, в зимнее время — нижней поверхностью льда и шугой [3], [4]. Ввиду разнородности этих факторов и их изменчивости по длине потока и во времени расчет гидравлического сопротивления естественных русел является сложной задачей. Сложность выбора коэффициента шероховатости и неопределенность этого понятия для естественных русел обусловили необходимость разработки новых способов расчета гидравлического сопротивления.

В сопротивлении естественных русел шероховатость выступает в трех видах, первым из которых является шероховатость зернистой поверхности дна; вторым — шероховатость, создаваемая валунами; третьим — шероховатость микроформ: рифелей и гряд. Кроме того, влияние на сопротивление движению воды оказывают также русловые мезоформы: косы, побочни, осередки, острова, изгибы русла и такие сложные образования, как перекаты. Этот вид сопротивления обычно называют *сопротивлением формы русла*. Сопротивление формы естественных русел в связи с перемещением и деформациями мезоформ может заметно изменяться во времени.

В рамках настоящей работы выполнен анализ материалов лабораторных и натурных исследований, проведенных разными авторами, по определению сопротивления движению воды в естественных руслах, выявлены основные факторы, определяющие гидравлическое сопротивление изгибов речных русел.

Разделение гидравлических сопротивлений по длине в зависимости от действующих факторов, таких как зернистая шероховатость дна, грядовое сопротивление и сопротивление формы русла, применительно к потокам с деформируемым руслом является достаточно затруднительным, так

как влияние каждого из них изменяется по длине реки и зависит от времени, точнее, от фазы гидрологического цикла. Поэтому необходимость выделения относительной доли любого из видов сопротивлений движению воды всегда представляет определенную условность.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В гидравлике мерой сопротивления по длине служит величина τ_0 касательного напряжения на дне, осредненного по смоченному периметру русла. Сила сопротивления, приложенная со стороны русла к потоку, на единицу его длины равна $\tau_0\chi$ (где χ — длина смоченного периметра). Сила трения заставляет поток терять энергию. При этом механическая энергия движущейся жидкости переходит в теплоту, рассеиваемую в окружающем пространстве. Механическая энергия, теряемая единицей массы жидкости на единице длины потока, равна силе трения.

Главной задачей теории гидравлического сопротивления является установление связи касательного напряжения на дне русла с параметрами потока: вязкостью и плотностью жидкости, скоростью течения, поперечным размером потока и т. д. Связь между касательным напряжением на дне и средней скоростью потока устанавливается формулами Шези и Дарси — Вейсбаха. По Шези $\tau_0 = \rho g U^2 / C^2$, а по Дарси — Вейсбаху $\tau_0 = \lambda \rho U^2 / 2$ (где ρ — плотность воды; U — средняя скорость в поперечном сечении; C — коэффициент Шези с размерностью $L^{1/2}T^{-1}$; λ — безразмерный коэффициент гидравлического трения). Соотношение между коэффициентами C и λ имеет вид $\lambda = 2g / C^2$.

В расчетах применяются обе формулы, различны лишь их сферы применения. Формула Дарси — Вейсбаха применяется преимущественно к потокам в трубах, формула Шези — к потокам в открытых руслах. В гидравлике открытых потоков для определения коэффициента Шези чаще всего применяют формулы, в которых сила трения на дне оценивается с помощью эмпирических коэффициентов шероховатости. В настоящее время наиболее часто используется формула Р. Маннинга:

$$C = \left(\frac{1}{n}\right) R^{1/6},$$

где R — гидравлический радиус;

n — коэффициент шероховатости с размерностью $L^{-1/3}T$.

Для естественных русел коэффициент шероховатости выражает суммарный эффект всех сопротивлений, встречающихся в руслах, и поэтому изменяется в широких пределах. В гидравлических справочниках [5] приведены подробные сведения о коэффициенте шероховатости в речных руслах, но в них нет никаких указаний на его изменение при колебаниях уровней. Между тем, как показывают исследования, эти изменения существенны, особенно в руслах с песчаными донными отложениями. Русла таких рек деформируемы и это значит, что русловой поток может изменять граничные условия собственного движения. Шероховатость дна и берегов не является здесь независимым фактором, она регулируется потоком. Колебания шероховатости во времени вместе с колебаниями глубин и скоростей течения образуют отклик потока на колебания водности реки. Взаимосвязь шероховатости дна с течением воды придает вопросам сопротивления естественных русел большую сложность. Поэтому применение в подвижном русле формулы Маннинга с табличными значениями коэффициентов шероховатости может приводить к грубым ошибкам.

Взаимосвязь между формой размываемого русла и кинематикой потока, вероятно, нигде не проявляется так явно, как на изгибе русла (рис. 1). В связи с этим движению воды в изогнутом русле посвящено большое число теоретических и экспериментальных исследований.

Данные экспериментальных и натуральных исследований [1]–[17], позволили выявить основные особенности движения потока на извилистых участках рек, одной из которых на поворотах русла является вероятность появления дополнительных потерь энергии. Суммарное сопротивление изогнутого участка русла складывается из трех главных частей: сопротивления зернистой поверхности дна, сопротивления донных гряд и сопротивления формы русла. Создаваемое изгибом добавочное сопротивление зависит от кривизны русла, быстроты изменения глубин по длине извилины и отражает воздействие на поток побочной, формирующихся у выпуклого берега.

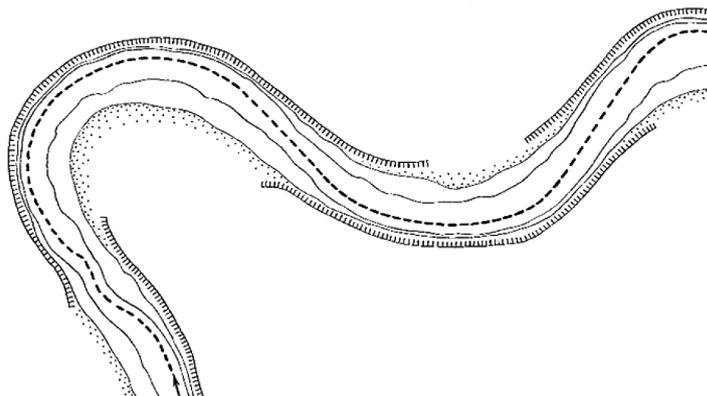


Рис. 1. Извилистый участок реки

Исследования сопротивления изгибов речных русел проводились как в лабораториях, так и в натуральных условиях. Большинство лабораторных исследований было выполнено в лотках с жесткими вертикальными стенками. В одной части экспериментов дно было плоским и жестким, в другой — размываемым.

Результаты (Results)

В работе Х. Рауза [6] приведены сведения об опытах С. Хайата, в которых было исследовано сопротивление жесткого изогнутого канала прямоугольного сечения шириной $B = 0,43$ м, состоящего из шести последовательных поворотов на угол 90° (рис. 2). Измерения были выполнены при трех значениях относительной глубины потока H/B : $1/16$, $1/8$ и $1/4$. В качестве безразмерной оценки потерь энергии в изогнутом русле был использован коэффициент

$$k_L = H_L / (U^2 / 2g), \quad (1)$$

где H_L — общие потери удельной энергии жидкости.

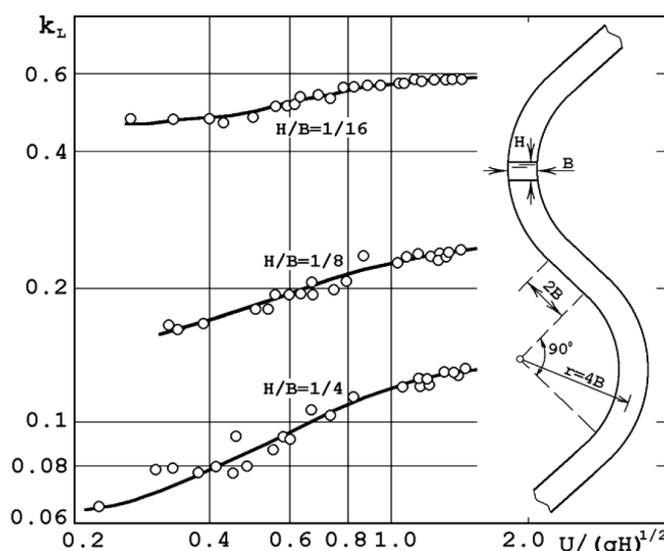


Рис. 2. График зависимости $k_L = f(U / \sqrt{gH})$ (по Хайату)

Сравнения с сопротивлением прямого канала в экспериментах Хайата выполнено не было. Опыты показали, что коэффициент k_L при каждом из значений H/B возрастает почти по линейному закону с ростом числа Фруда U / \sqrt{gH} (см. рис. 2). При фиксированном числе Фруда коэффициент k_L убывал с ростом H/B .

Гидравлическое сопротивление изогнутого русла с размываемым дном исследовали И. Ониши, С. С. Джейн и Дж. Кеннеди [7]. Опыты проводились в лотке, составленном из двух последовательных круговых колен с углами поворота 90° (рис. 3). Ширина лотка составляла 2,34 м, радиус осевой линии — 8,54 м. На дно лотка был уложен песок с крупностью частиц $d_{50} = 0,25$ мм. Опыты в полном объеме были повторены при ширине лотка $B = 1,17$ м. Для уменьшения ширины лотка в 2 раза его разделяли вертикальной стенкой. Рельеф дна в опытах формировался самим потоком. Когда рельеф дна становился стабильным, измерялись основные характеристики потока. Глубины потока в лотках составляли 0,08–0,13 м, скорости течения — 0,21–0,56 м. Параллельно с опытами в криволинейном лотке проводились опыты в прямолинейном канале шириной 0,9 м.

Разность потерь удельной энергии жидкости на изогнутом и прямом участках русла длиной L при одних и тех же значениях гидравлического радиуса и средней скорости течения в работе [7] определялась по выражению

$$h_L = h_{fS} - h_S = (L/R)(\lambda_S - \lambda)(U^2/2g). \quad (2)$$

В формуле (2) нижний индекс S обозначает элементы потока в изогнутом лотке. В качестве безразмерной оценки разности потерь энергии был использован коэффициент

$$\zeta_L = (L/R)(\lambda_S - \lambda). \quad (3)$$

После анализа факторов, определяющих движение воды в изогнутом русле с размываемым дном, было принято, что величина ζ_L есть функция трех безразмерных параметров: числа Фруда, относительной зернистой гладкости дна и относительной кривизны русла:

$$\zeta_L = f(U/\sqrt{gR}, R/d_{50}, B/r). \quad (4)$$

График этой функции приведен на рис. 3. Опыты показали следующее. Характеризующий сопротивление изгиба коэффициент ζ_L при фиксированных значениях R/d_{50} и B/r растет с числом Фруда почти по линейному закону. При малых глубинах в лотках ($R/d_{50} = 310$) коэффициент ζ_L оказался отрицательным (сопротивление изогнутого лотка было меньше прямолинейного). Если при этом мала также ширина лотка ($B/r = 0,137$, $B/R = 15,1$), то значения ζ_L близки к $-0,5$. По мнению авторов исследования, этот результат можно объяснить тем, что в узком лотке побочень у выпуклого берега был слабо развит, в широком лотке коэффициент ζ_L увеличивался вместе с высотой побочня.

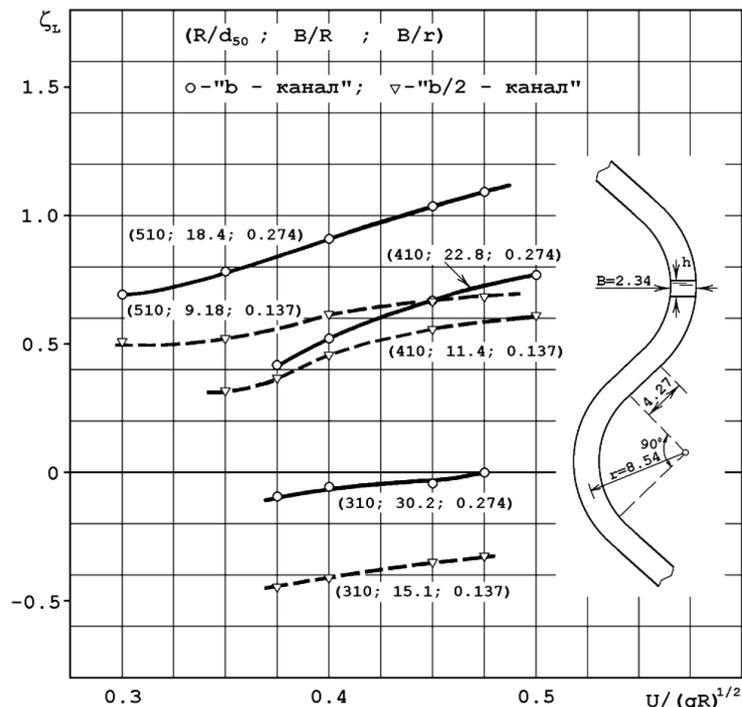


Рис. 3. График функции $\zeta_L = f(U/\sqrt{gR}, R/d_{50}, B/r)$ (по Ониши и др.)

Ониши и другие исследователи пришли к выводу, что основными факторами, влияющими на гидравлическое сопротивление в криволинейных каналах с подвижным дном, являются размеры и форма побочня у выпуклого берега, а также изменения микроформ форм дна (рифели и гряды).

Исследования, выполненные Л. Миккельсеном и Ф. Энгелундом [8], показали, что сопротивление в криволинейных лотках возрастает с увеличением относительной глубины по мере затопления побочня у выпуклого берега. При малых глубинах, когда побочень не затоплен или затоплен слабо, сопротивление изогнутого русла может быть меньше сопротивления прямолинейного русла с теми же осредненными по длине участка глубинами и скоростями течения. При больших глубинах, когда поток перетекает через побочень, сопротивление извилистого русла больше прямолинейного. В публикации [8] также отмечается, что при изучении гидравлического сопротивления на участках изгибов большинство исследователей переоценивают роль вторичных течений. По их оценке, доля дополнительных потерь энергии, обусловленная наличием вторичных течений, составляет около 1 % от суммарных потерь энергии. Так как одним из источников сопротивления потока в меандрирующих руслах является грядовая шероховатость, необходимо рассмотреть процесс формирования гряд в речной извилине. Наиболее полные исследования по этому вопросу, выполненные в работах [9], [10], показали, что в лотках криволинейных очертаний движение наносов принимает разные формы в зависимости от участка поворота. Были выделены три зоны, в которых наблюдаются качественно однородные по характеру формы движения наносов в пределах изгиба русла (рис. 4).

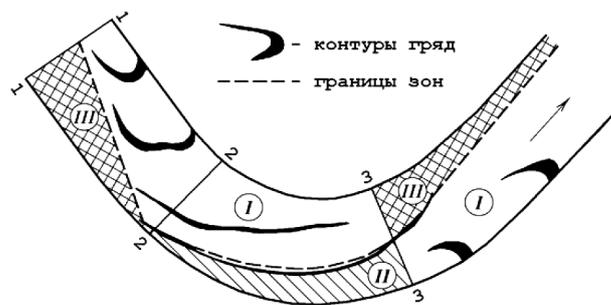


Рис. 4. Деление участка поворота на зоны по характеру движения наносов [9], [10]

Границами зоны I является левый берег в пределах створов 1–3. Формирующиеся в районе створа 1 гряды при своем движении расширяются и перекашиваются. Уменьшение глубин у выпуклого берега сопровождается уменьшением высоты гряд. В створе 2 расход наносов практически равномерно распределен по ширине лотка. Далее от створа 2 до створа 3 наносы резко переходят к вогнутому берегу. В вершине поворота весь твердый расход наносов сосредоточен у этого берега. Таким образом, в пределах зоны I происходит процесс формирования гряд, их движение и исчезновение.

Зона II расположена в вершине извилины. По длине этой зоны происходит увеличение расхода наносов до величины, близкой всему твердому расходу. Поверхностные струи потока в зоне II направлены в сторону вогнутого берега, а донные — к выпуклому. В этой зоне гряды не наблюдаются или имеют небольшую высоту. В створе 3, который является нижней границей зоны, вновь создаются условия для формирования гряд.

У выпуклого берега ниже зоны II в исследованиях [9] и [10] была выделена зона III с характерными для нее малыми глубинами и небольшими значениями жидкого и твердого расходов. Русловыми формами этой зоны являются вытянутые косы, за которыми располагаются затонные участки. Подобная картина наблюдалась также в зоне III между створами 1–2. Таким образом, результаты проведенных исследований [9] и [10] показали, что в отличие от прямолинейных участков русел, где формируется устойчивый грядовой рельеф, в руслах криволинейных очертаний имеются области формирования гряд и их движения, а также обширные зоны (плесовые ложины у вогнутых берегов), где гряды или не наблюдаются совсем, или имеют небольшую высоту. Были про-

ведены исследования сопротивления изгибов на аэродинамических моделях [11], [12]. Опыты с напорными потоками воздуха были выполнены в каналах прямоугольного сечения шириной 40 см и высотой $h = 2,0, 2,5$ и $3,0$ см. Измерения проводились в трех каналах, различавшихся формой в плане (рис. 5). В двух сериях опытов на модели III каналу было придано трапецевидное поперечное сечение. Дно и боковые стенки каналов были изготовлены из пластилина. В одной серии опытов на каждой модели на дно наклеивался песок с медианной крупностью частиц $0,375$ мм.

Кроме моделей криволинейных очертаний была построена прямолинейная модель, имевшая те же поперечные размеры и ту же шероховатость дна и стенок, что у извилистых каналов. Это позволило найти для всех серий опытов значения коэффициента $\zeta_L = (h_{fs} - h_s)(2g / U^2)$, который характеризует сопротивление изгиба.

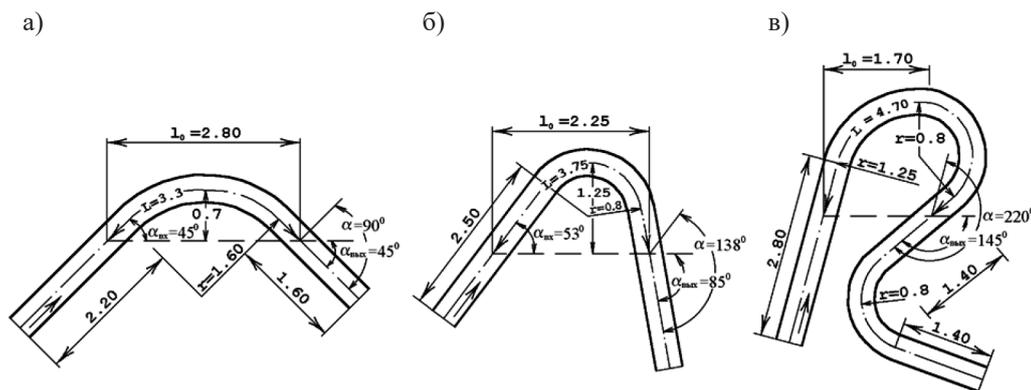


Рис. 5. Плановые очертания модели I (а), II (б), III (в)

Было установлено, что коэффициент ζ_L зависит от трех параметров: коэффициента трения в прямолинейном канале λ , отношения ширины канала к моделирующей глубине B / h_m и развитости извилины L / l_0 . При измерениях в аэродинамических каналах моделирующей глубиной называется расстояние h_m от дна модели до поверхности максимальных скоростей. Развитость извилины представляет отношение длины L по оси русла между точками перегиба к длине прямой l_0 , соединяющей эти точки. График связи $\zeta_L = f(\lambda, B / h_m, L / l_0)$ приведен на рис. 6.

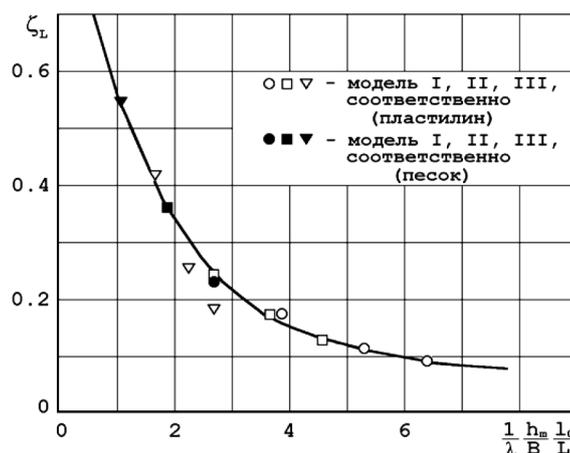


Рис. 6. График функции (5)

Данная зависимость описывается уравнением

$$\zeta_L = 0,63\lambda(B / h_m)(L / l_0). \quad (5)$$

Согласно формуле (5), отрицательные значения k_L невозможны. Опыты, выполненные на жестких моделях, показали, что доля дополнительных потерь энергии на исследованных изги-

бах русла составила 10–20 % от потерь энергии по длине. Сохраняющаяся в настоящее время неопределенность разделения полного сопротивления русла на зернистую и грядовую составляющие и сопротивление формы заставила искать другой подход к составлению формул гидравлического сопротивления русел с мелкозернистыми грунтами дна.

Основоположником нового направления исследований гидравлического сопротивления речных русел с песчаными донными отложениями является К. В. Гришанин [13], [14], основные идеи которого в построении формул гидравлического сопротивления русел с мелкозернистыми грунтами дна сводятся к следующему. Искомой величиной является полный коэффициент Шези — C , в качестве главного аргумента которого принимается скорость течения воды, диаметр донных частиц в расчетную формулу не вводится, так как он неявно присутствует, определяя возможные границы применимости формулы. В качестве параметра однозначности, учитывающего различные поперечные размеры потоков, используется отношение B / H . Считается, что перемещение мелких частиц не свободно от влияния вязкости воды. Кроме того, К. В. Гришанин, исключая из формулы для коэффициента Шези диаметр частиц, рекомендует нормировать скорость течения величиной $(gv)^{1/3}$, где v — коэффициент кинематической вязкости воды. Такое решение обусловлено тем, что сопротивление ровного дна, сложенного из частиц песчаной фракции, в принципе подвержено влиянию вязкости, в то время как вариации диаметра частиц в границах этой фракции не оказывают заметного влияния ни на сопротивление ровного дна, ни на грядовое сопротивление. Кроме того, принятое выражение безразмерной скорости есть не что иное, как корень кубический из произведения числа Рейнольдса на число Фруда: $U / \sqrt[3]{gv} = (Re \cdot Fr)^{1/3}$.

На основе данного подхода к составлению формулы гидравлического сопротивления, в публикации [15] была предпринята попытка установить связь между полным коэффициентом Шези для извилистых участков и параметрами потока и русла по натурным данным. Основу расчетов составили материалы натурных наблюдений на отдельных извилинах рек Вятки, Десны, Дона, Иртыша, Луги и Оки. На всех участках дно было сложено мелким и средним песком и наблюдался грядовый транспорт влекомых наносов. Относительная зернистая шероховатость дна была исключена из числа параметров, определяющих значения коэффициента Шези. Отношение r_0 / B радиуса кривизны осевой линии русла к его средней ширине в пределах извилины составило у рассматриваемых изгибов 1,46–10,2, а степень развитости L / l_0 — 1,07–2,86.

В качестве параметров, определяющих значения полного коэффициента Шези, были приняты следующие: число Фруда, скорость течения, нормированная величиной кинематической вязкости $U / \sqrt[3]{gv}$, а также безразмерные величины, характеризующие геометрию русла (B / H , B / r_0 , L / l_0 , l_0 / B и др.). Величины C , U , H , B и r_0 осреднялись по длине извилины (между точками перегиба осевой линии). Применение метода многофакторного регрессионного анализа позволило установить, что наиболее значимым параметром в данном случае является число Фруда (рис. 7).

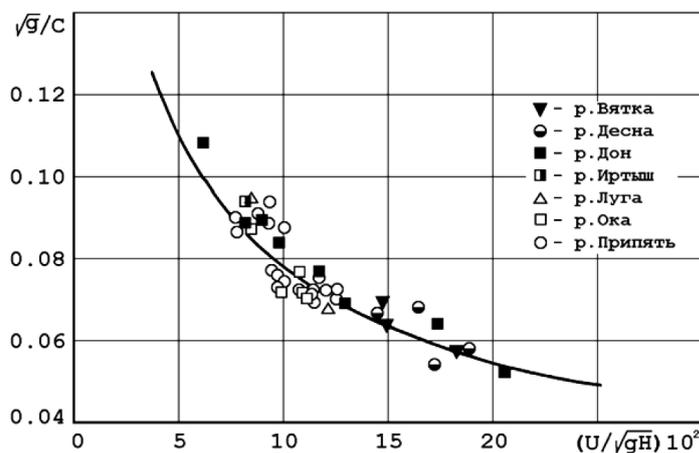


Рис. 7. График функции (6)

Данные по всем исследуемым извилинам хорошо (с коэффициентом корреляции 0,92) удовлетворяют уравнению

$$C / \sqrt{g} = 42,25(U / \sqrt{gH})^{0,53}. \quad (6)$$

Ранее исследуя гидравлическое сопротивление на перекатах, Г. Л. Гладков [16] получил формулу для полного коэффициента Шези вида

$$C / \sqrt{g} = 71,4(U / \sqrt{gH})^{3/4}. \quad (7)$$

График зависимости (7) приведен на рис. 8.

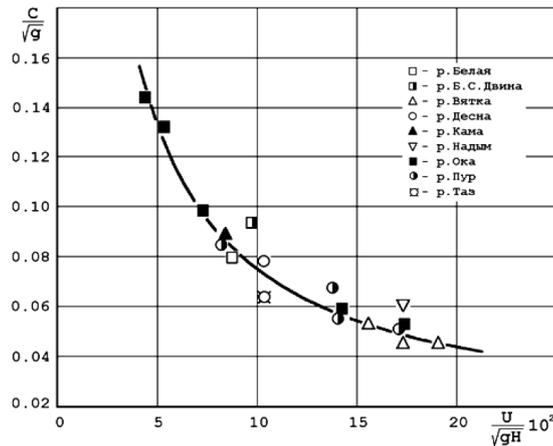


Рис. 8. График зависимости (7)

Показатель степени в формуле (6) меньше, чем показатель степени в формуле Гладкова (7): коэффициент Шези на изгибах русла при изменении числа Фруда изменяется меньше, чем на перекатах. При малых числах Фруда значения коэффициента Шези по формуле (6) меньше, чем по формуле Гладкова, а при больших числах Фруда — больше.

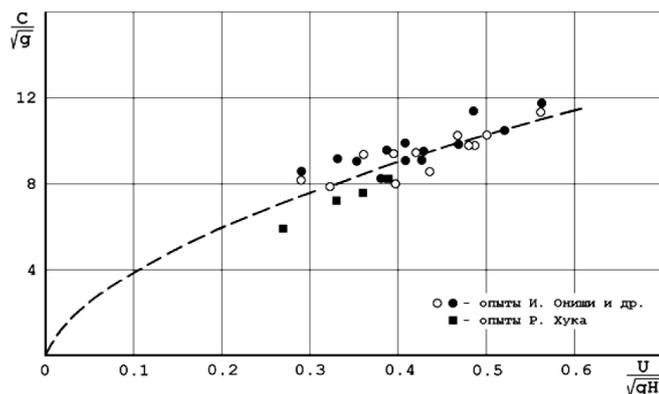


Рис. 9. График зависимости полного коэффициента Шези от числа Фруда

Материалы лабораторных исследований И. Ониши и др. [7] и Р. Хука [17], показали, что опыты в лотках дают степенную функцию примерно с тем же показателем, что и в формуле (6), но с меньшим значением коэффициента пропорциональности (рис. 9).

Как натурным, так и экспериментальным данным удовлетворяет формула

$$C / \sqrt{g} = 1,12(U / \sqrt[3]{g\nu})^{1/2} (r_0 / H)^{1/6}. \quad (8)$$

График зависимости (8) представлен на рис. 10.

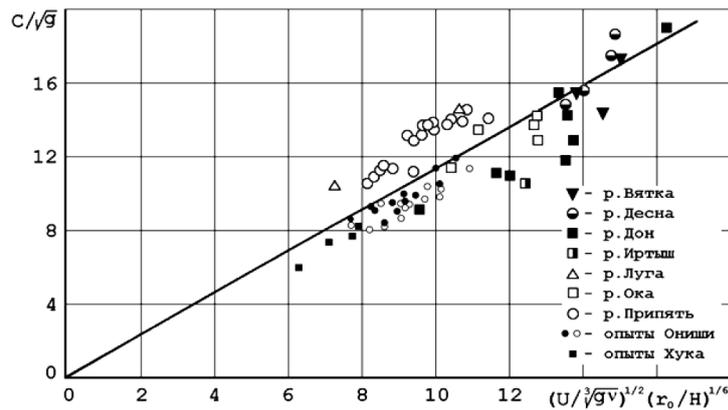


Рис. 10. График функции (8)

Обобщая полученные результаты, следует отметить, что как натурные, так и лабораторные наблюдения показывают наличие в изогнутых руслах связи между полным коэффициентом Шези и средней скоростью течения вида: $C \sim U^m$, где $m \approx 1/2$. Формулы (6) и (8) действительны для изгибов рек с песчаными донными отложениями.

Заключение (Conclusion)

Необходимо признать, что благодаря исследованиям, выполненным в последние годы, в изучении гидравлического сопротивления изгибов подвижных русел достигнут определенный успех. Лабораторные исследования позволили выявить основные факторы, определяющие гидравлическое сопротивление изгибов речных русел. Этими факторами являются форма и размеры побочня, формирующегося у выпуклого берега, а также грядовый рельеф дна. Добавочное сопротивление, создаваемое изгибом, невелико (в среднем составляет около 10 % от сопротивления прямолинейного русла). Потери энергии на изгибе могут быть как больше, так и меньше потерь на прямолинейном участке с такой же средней глубиной и скоростью течения. Материалы натуральных и лабораторных наблюдений позволили установить, что между полным коэффициентом Шези на изгибе и средней скоростью течения существует соотношение пропорциональности: $C \sim U^m$, где $m \approx 1/2$.

Несмотря на достигнутые успехи в ходе проведения исследований проблемы оценки потерь энергии в естественных судоходных реках с подвижным дном (установление прямой связи коэффициента Шези со скоростью течения, а также его тесной связи с относительной длиной гряд, вне зависимости от диаметра частиц, из которых они сложены), остается нерешенным еще ряд вопросов. Основная сложность заключается в том, что русловой поток, взаимодействующий с подвижным дном, самостоятельно регулирует граничные условия своего движения, используя имеющиеся в его распоряжении степени свободы. При этом характер и направленность изменений, происходящих в системе *поток ↔ русло*, до настоящего времени плохо изучены. Разделение гидравлических сопротивлений по длине в зависимости от действующих факторов, таких как зернистость шероховатость дна, грядовое сопротивление и сопротивление формы русла применительно к потокам с деформируемым руслом, является достаточно затруднительным, так как вклад каждой составляющей изменяется по длине реки и зависит от времени, точнее, фазы гидрологического цикла. Поэтому необходимость выделения относительной доли любого из видов сопротивлений движению воды всегда представляет определенную условность.

На реках с мелкозернистыми грунтами предлагается использовать в расчетах зависимости, построенные на основе установленной связи полного коэффициента Шези от скорости течения. Их применение позволит прогнозировать изменение характеристик гидравлического сопротивления с изменением уровня воды, а также оценить реакцию потока на искусственное изменение геометрии русла в результате реализации проектных рекомендаций на участке реки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gladkov G. Sediment Transport and Water Flow Resistance in Alluvial River Channels: Modified Model of Transport of Non-Uniform Grain-Size Sediments / G. L. Gladkov [et al.] // *Water*. — 2021. — Vol. 13. — Is. 15. — P. 2038. DOI: 10.3390/w13152038.
2. Гришанин К. В. Динамика русловых потоков / К. В. Гришанин. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 311 с.
3. Гладков Г. Л. Исследование зернистой шероховатости дна речных русел / Г. Л. Гладков // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 333–346. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-336-346. — EDN JFWJDH.
4. Гладков Г. Л. Гидравлическое сопротивление движению воды и транспорт наносов в реках / Г. Л. Гладков, М. В. Журавлев // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1044–1055. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1044-1055. — EDN SYRZRR.
5. Чоу В. Т. Гидравлика открытых каналов / Пер. с англ. И. В. Филимоновой / В. Т. Чоу. — М.: Стройиздат, 1969. — 464 с.
6. Rouse H. Critical analysis of open channel resistance / H. Rouse // *Proc. ASCE Hydr. Div.* — 1965. — Vol. 91. — Is. 4. — Pp. 1–23.
7. Onishi Y. Effects of meandering in alluvial streams / Y. Onishi, S. C. Jain, J. F. Kennedy // *Proc. ASCE Hydr. Div.* — 1976. — Vol. 102. — Is. 7. — Pp. 899–917.
8. Mikkelsen L., Englund F. Flow resistance in meandering channels / L. Mikkelsen, F. Englund // *Prog. Rep.43. — Ins. Hydrodyn. and Hydr. Eng. Tech. Univ. Denmark*. — 1977. — Pp.7–10.
9. Великанова З. М. Лабораторные исследования речной извилины / З. М. Великанова // *Труды ГГИ*. — 1968. — № 147. — С. 40–52.
10. Великанова З. М. Грядовое движение наносов на модели речной извилины / З. М. Великанова // *Там же*. — 1969. — № . 169. — С. 87–96.
11. Журавлев М. В. Лабораторные исследования потерь напора на повороте русла / М. В. Журавлев // *Русловой процесс на реках и путевые работы для судоходства и повышение эффективности работы гидротехнических сооружений: сб. Трудов ЛИВТа*. — 1985. — С. 185–191.
12. Журавлев М. В. Лабораторные исследования гидравлического сопротивления речных извилин / М. В. Журавлев // *Совершенствование технической эксплуатации, проектирования и расчета гидротехнических сооружений и технологии путевых работ на реках: сб. тр. ЛИВТа*. — 1990. — С. 101–106.
13. Гришанин К. В. Как ведет себя речной поток? / К. В. Гришанин // *Метеорология и гидрология*. — 1984. — № . 9. — С. 95–100.
14. Гришанин К. В. Основы динамики русловых потоков. / К. В. Гришанин. — М.: Транспорт, 1990. — 319 с.
15. Журавлев М. В. Гидравлическое сопротивление на повороте речного русла / М. В. Журавлев // *Повышение пропускной способности портовых и судоходных сооружений: сб. тр. ЛИВТа*. — 1987. — С. 184–190.
16. Гладков Г. Л. Гидравлическое сопротивление подвижного русла при низких уровнях воды / Г. Л. Гладков // *Изв. Вузов. Строительство и архитектура*. — 1984. — № 5. — С. 86–89.
17. Hooke R. L. Distribution of sediment transport and sear stess in a meander bend / R. L. Hooke // *J. Geology*. — 1975. — Vol. 83. — Is. 5. — Pp. 543–565.

REFERENCES

1. Gladkov G. “Sediment Transport and Water Flow Resistance in Alluvial River Channels: Modified Model of Transport of Non-Uniform Grain-Size Sediments.” *Water* 13.15 (2021): P. 2038. DOI: 10.3390/w13152038.
2. Grishanin K. V. *Dinamika ruslovyh potokov*. L.: Gidrometeoizdat, 1979.
3. Gladkov G. L. “Issledovanie zernistoj sherohovatosti dna rechnyh rusel.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 333–346. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-336-346.
4. Gladkov G. L. “Gidravlichesкое soprotivlenie dvizheniyu vody i transport nanosov v rekah.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2020): 1044–1055. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1044-1055.

5. CHou V. T. *Gidravlika otkrytyh kanalov*. Per. s angl. M.: Strojizdat, 1969.
6. Rouse H. "Critical analysis of open channel resistance." *Proc. ASCE Hydr. Div.* 91.4 (1965): 1–23.
7. Onishi, Y., Jain, S.C., Kennedy, J.F. "Effects of meandering in alluvial streams." *Proc. ASCE Hydr. Div.* 102.7 (1976): 899–917.
8. Mikkelsen, L., Engelund, F. "Flow resistance in meandering channels." *Prog. Rep.43. — Ins. Hydrodyn. and Hydr. Eng. Tech. Univ. Denmark.*, 1977: 7–10.
9. Velikanova Z. M. "Laboratornye issledovaniya rechnoj izviliny." *Trudy GGI* 147 (1968): 40–52.
10. Velikanova Z. M. "Gryadovoe dvizhenie nanosov na modeli rechnoj izviliny." *Trudy GGI* 169 (1969): 87–96.
11. ZHuravlev M. V. "Laboratornye issledovaniya poter' napora na povorote rusla." *Ruslovoj process na rekah i putevye raboty dlya sudohodstva i povyshenie effektivnosti raboty gidrotekhnicheskikh sooruzhenij (Sb. Trudov LIVTa)*, 1985: 185–191.
12. ZHuravlev M. V. "Laboratornye issledovaniya gidravlicheskogo soprotivleniya rechnyh izvilin." *Sovershenstvovanie tekhnicheskoy ekspluatatsii, proektirovaniya i rascheta gidrotekhnicheskikh sooruzhenij i tekhnologii putevyh rabot na rekah (Sb. Trudov LIVTa)*, 1990: 101–106.
13. Grishanin K. V. "Kak vedet sebya rechnoj potok?" *Meteorologiya i gidrologiya* 9 (1984): 95–100.
14. Grishanin K. V. *Osnovy dinamiki ruslovyh potokov*. M.: Transport, 1990.
15. ZHuravlev M. V. "Gidravlichesкое soprotivlenie na povorote rechnogo rusla." *Povyshenie propusknoy sposobnosti portovyh i sudohodnyh sooruzhenij (Sb. Trudov LIVTa)*, 1987: 184–190.
16. Gladkov G. L. "Gidravlichesкое soprotivlenie podvizhnogo rusla pri nizkih urovnyah vody." *Izv. Vuzov. Stroitel'stvo i arhitektura* 5 (1984): 86–89.
17. Hooke R. L. "Distribution of sediment transport and sear stress in a meander bend." *J. Geology* 83.5 (1975): 543–565.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Журавлев Михаил Валентинович — кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
 e-mail: zhuravlevmv@gumrf.ru

Гладков Геннадий Леонидович — доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
 e-mail: gladkovgl@gumrf.ru

Беляков Пахом Витальевич — кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
 e-mail: belyakovPV@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhuravlev, Michail V. — PhD, associate professor Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
 e-mail: zhuravlevmv@gumrf.ru

Gladkov, Gennadii L. — Dr. of Technical Sciences, professor Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
 e-mail: gladkovgl@gumrf.ru

Belyakov, Pachom V. — PhD, associate professor Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
 e-mail: belyakovPV@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 13 сентября 2024 г.
 Received: September 13, 2024.

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-738-748

REVIEW OF MODERN TECHNOLOGIES OF VESSEL MONITORING IN THE WATER AREAS OF THE INLAND WATERWAYS USING VIDEO SURVEILLANCE TOOLS

A. P. Bespalov, V. V. Karetnikov

Admiral S. O. Makarov State University of Marine and River Engineering”,
St. Petersburg, Russian Federation.

At present, there is a problem on inland waterways located within the boundaries of large settlements to ensure monitoring of vessel traffic, including small vessels. This situation is due to limitations on the use of traditional means of monitoring of inland waterway vessels, caused primarily by restrictions on the use of radar systems and radio-technical means operating in the ultra-short-wave frequency range within the city limits. At the same time in large cities of the Russian Federation implemented and successfully used video surveillance systems. The system operating in the city of Moscow to monitor the water area within the city as part of the city traffic control system is considered. Most of the sections of inland waterways located within the limits of St. Petersburg fall within the range of the cameras. The article considers possible approaches to use the city video surveillance system for monitoring the water area within the city limits of St. Petersburg. The paper describes technologies based on artificial neural networks potentially suitable for identification of ships and determination of their exact location at a given moment of time. Advantages and disadvantages of the considered methods are analyzed, as well as a variant of solving the inverse problem of bearing of ships (from the shore) using video surveillance systems consisting of two cameras is proposed. The algorithm of the system operation for identification and determination of vessel movement parameters is proposed. Domestic and foreign experience of solving the problems of vessel identification using video surveillance systems, as well as determining the parameters of vessel movement is analyzed. Several neural networks (object detection, text recognition) are proposed as a solution as a basis for further study of the described problem.

Keywords: vessel movement monitoring, artificial neural networks, vessel detection on video stream, vessel identification, vessel positioning.

For citation:

Bespalov Aleksandr P. and Vladimir V. Karetnikov “Review of modern technologies of vessel monitoring in the water areas of the inland waterways using video surveillance tools.” *Vestnik of the State University of Sea and River Fleet named after Admiral S. O. Makarov* 16.5 (2024): 738–748. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-738-748.

УДК 629.125, 004.89

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МОНИТОРИНГА СУДОВ НА АКВАТОРИЯХ ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ

А. П. Беспалов, В. В. Каретников

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Темой работы является исследование проблемы обеспечения мониторинга движения судов, в том числе маломерных на внутренних водных путях, расположенных в границах крупных населенных пунктов. Отмечается, что такая ситуация обусловлена в первую очередь ограничениями в применении радиолокационных систем и радиотехнических средств, работающих в ультракоротковолновом частотном диапазоне в черте города. Акцентируется внимание на том, что в крупных городах Российской Федерации внедрены и успешно используются системы видеонаблюдения. Рассмотрена система, действующая в г. Москве для наблюдения за акваторией в черте города в рамках системы управления движением транспорта. В зону действия камер попадает большинство участков внутренних водных путей, расположенных в черте г. Санкт-Петербурга.

Рассмотрены возможные подходы использования городской системы видеонаблюдения для мониторинга акватории в черте г. Санкт-Петербурга. Описаны технологии на основе искусственных нейронных сетей потенциально пригодные для идентификации судов и определения их точного местонахождения в заданный момент времени. Проанализированы преимущества и недостатки рассмотренных методов, а также предложен вариант решения обратной задачи пеленга судов (с берега) с применением систем видеонаблюдения, состоящее из двух камер. Предложен алгоритм работы системы для идентификации и определения параметров движения судов. Проанализирован отечественный и зарубежный опыт решения проблем идентификации судна с использованием систем видеонаблюдения, а также определения параметров движения судов. В качестве решения предложены следующие нейронные сети: поиск объекта и распознавание текста как основа для дальнейшего изучения исследуемой проблемы.

Ключевые слова: мониторинг движения судов, искусственные нейронные сети, обнаружение судов на видеопотоке, идентификация судов, определение местоположения судов.

Для цитирования:

Беспалов А. П. Обзор современных технологий мониторинга судов на акваториях ВВП с использованием средств видеонаблюдения / А. П. Беспалов, В. В. Каретников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 5. — С. 738–748. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-738-748.

Введение (Introduction)

В течение последних 10–15 лет в крупных городах формируются системы видеонаблюдения, в зону действия которых попадают отдельные участки водных акваторий, расположенных в черте города. Это позволяет осуществлять мониторинг движения флота на таких акваториях с использованием камер видеонаблюдения. Подобная ситуация также имеет место в г. Санкт-Петербурге. Актуальность данного решения безусловна ввиду наличия в городе достаточно большого количества маломерных судов, на которых установка транспондеров АИС необязательна и не производится. Кроме того, применение АИС в черте города осложняется рельефом водных артерий, городской застройкой, а также большим количеством источников, сосредоточенных по спектру помех.

Примером такой системы является московская система Центра организации дорожного движения (ЦОДД) для наблюдения за трафиком на водных акваториях, расположенных в черте г. Москвы. Данная система включает в себя несколько сотен камер, систему идентификации судов, а также позволяет определять основные элементы движения судов по реке. Однако она не подразумевает определение точного местоположения судов в системе координат WGS-84 или другой системе координат, а также и элементов их движения. Указанная система создавалась независимо, причем стоимость ее оказалась весьма значительной. В то же время использование камер практически любой системы видеонаблюдения дает возможность получать подобные или даже лучшие результаты для обеспечения мониторинга и управления судоходной обстановкой в черте города. Так, например, в г. Санкт-Петербурге внедрена система видеонаблюдения «Безопасный город», которая не подразумевает в ее текущем состоянии решить такую задачу. Однако при получении данных камер видеонаблюдения и соответствующей обработки можно реализовать элементы системы мониторинга безопасности судоходства на акваториях в черте города. В такой ситуации необходимо учесть некоторые факторы, а именно: наличие большого количества мостов, узких каналов, а также большое количество судов малой размерности и высокие ограждения, перекрывающие видимость. Суда в узких каналах могут занимать до 70 % ширины, вследствие чего распознавание названия судна будет осложнено. В данном случае основной проблемой являются суда малой размерности, так как их названия зачастую размещаются довольно специфично из-за сравнительно невысокого надводного борта таких судов.

Система видеонаблюдения за судами позволит получать информацию о перемещении судов диспетчеру служб движения Администрации бассейна внутренних водных путей (АБ ВВП) из нескольких независимых источников, что положительно отразится на уровне обеспечения безопасности судоходства в акваториях, расположенных в черте города. В случае внедрения

такой системы появится возможность идентификации самого судна, определение его названия и местоположения. Кроме того, можно получить данные о направлении движения, определить курс судна и скорость его движения. Указанные параметры позволят также осуществлять контроль исполнения обязательных требований по обеспечению безопасности плавания судов на ВВП РФ.

В зарубежных научных работах исследователи изучают использование искусственных нейронных сетей (ИНС) для мониторинга судоходства. Например, в [1] рассматривается алгоритм обнаружения движущихся судов всех типов. Эта система рассматривается как вспомогательная, дополняющая данные автоматической идентификационной системы (АИС), систем радиолокационного наблюдения (РЛС) и других приборов.

В данном исследовании предлагается использовать ИНС для обнаружения и отслеживания судов на ВВП. Этот алгоритм может быть использован в качестве дополнения к существующим системам мониторинга судоходства, таким как АИС, РЛС и др. приборы [1], [2].

В статье [3] предложен инновационный подход к определению местоположения судов внутреннего плавания, основанный на использовании существующей инфраструктуры камер видеонаблюдения, установленных на мостах и причалах. Предложенный метод включает преобразование изображений с камер в геодезическую область данных с помощью модифицированного метода проективного преобразования, дополненного последовательным проективным преобразованием (SPT). Такой подход позволяет использовать виртуальные опорные точки для расчета коэффициентов преобразования, применяемых затем для определения положения судов и одновременной калибровки промышленной камеры [3].

Методы и материалы (Methods and Materials)

Обнаружение судна. Обнаружения объектов на кадре видеонаблюдения, полученного с камер видеонаблюдения, является довольно распространенной задачей, основным способом решения которой в последнее время является применение искусственных нейронных сетей [4]–[6]. Задача по определению и последующей идентификации судна на изображении решалась многократно. Основным направлением решения данной задачи в рамках судоходства является определение перемещения морских судов в прибрежных зонах [7]–[9]. В случае обнаружения надводных объектов на реках с использованием компьютерного зрения следует учитывать, что в условиях рек и каналов «шумящими» воздействиями будут являться берега и постройки, расположенные на них. При этом необходимо отметить, что при организации видеонаблюдения на ВВП, камеры устанавливаются, как правило, с отрицательным наклоном относительно линии горизонта. При установке камер на коренном берегу угол обзора на акватории будет выше, чем в случае установки камер на пойменном берегу. При этом необходимо учитывать, что в основном наборы данных для обучения нейронных сетей состоят из изображений морских судов, что не отвечает задачам идентификации речных, а тем более маломерных судов ввиду значительной разницы в габаритных размерах, конструкции, а также других особенностей.

Первостепенной задачей для решения данной проблемы будет являться сбор изображений речных судов различного рода для последующей их маркировки. Таким образом, можно составить набор данных для предварительного обучения нейронной сети, задачей которой будет являться определение и последующая идентификация судна по его изображению. Для определения судна на изображении, полученном с камеры, можно использовать два подхода.

Первый подход, называемый Object Detection (поиск объектов), является проверенным и часто применяемым в задачах определения морских судов на изображении [10], [11]. Он подразумевает выделение судна прямоугольником, центр которого совпадает с центром судна на изображении (рис. 1). Данный подход позволяет получать решение указанной задачи достаточно быстро, однако он подразумевает наличие судна целиком на изображении. Также возможны погрешности в определении прямоугольника, в котором находится судно из-за отражения корпуса судна в воде. При использовании этого подхода возможно применение предобученных нейронных сетей (например, YOLOv11).

Существует несколько версий моделей нейронных сетей с различным количеством параметров, оказывающих влияние на точность и скорость обработки исходных изображений. Так, версия YOLO8n имеет 3,2 млн параметров и значение метрики mAP (mean Average Precision, средняя точность) равно 37,3. Время работы для обработки кадра составляет 0,99 мс. Версия YOLOv8x имеет 68,2 млн параметров, метрика mAP равна 53,9, среднее время обработки составляет 3,53 мс. Все метрики рассчитывались на изображениях размером 640*640 пикселей.



Рис. 1. Маркировка судов на изображении для поиска объектов¹

Второй подход является более трудоемким, так как подразумевает маркировку не только судов на изображении, но и маркировку фона. Такие задачи называются Image Segmentation (сегментация изображений) и подразумевают определение класса для каждого пикселя изображения [12], [13]. В условиях г. Санкт-Петербурга фоном будут являться: поверхность воды, отвесные берега, набережные, здания и сооружения (рис. 2) для сегментации изображения². Данный подход позволяет идентифицировать судно с изображения более точно, по сравнению с первым, при этом повысится вероятность корректного определения судна. Также повысится точность в определении центральной точки судна для заданного момента времени за счет исключения из обработки (или анализа) «пикселей фона».



Рис. 2. Маркировка судов на изображении для его сегментации

¹ Job Schot — Flickr [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.flickr.com/photos/144587555@N04>

² Beyond Simple Cutouts: Advanced Segmentation Techniques with Segment Anything [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.labelvisor.com/beyond-simple-cutouts-advanced-segmentation-techniques-with-segment-anything> (дата обращения: 28.08.2024).

Версия YOLOv8 для сегментации изображения (YOLOv8n-seg) имеет 3,4 млн параметров, mAP = 36,7, время обработки — 1,21 мс. Версия YOLOv8x-seg имеет 71,8 млн параметров, mAP = 53,4, время обработки — 4,02 мс.

Идентификация судна. Для распознавания названия судна необходимо учесть следующее обстоятельство: названия судна могут быть размещены как на носу судна, так и на корме. Причем месторасположение названия может различаться для разного класса судов^{3,4,5,6}. Так, например, большинство катеров имеют название на носу судна, нанесенное на относительно ровную поверхность корпуса судна. На надувных моторных лодках названия могут быть размещены на борту цилиндрической формы. Ввиду этих условий возникает сложность в определении местоположения названия маломерного судна. Кроме того, необходимо учитывать, что маломерные суда могут иметь название и номер государственной регистрации.

С учетом указанных факторов необходимо реализовать систему, которая будет находить название судна, а также переводить его из изображения в текст, после чего должна осуществляться однозначная идентификация. Для этого необходимо иметь набор данных для определения названий судов. Этот набор данных подразумевает наличие изображений с судами, а также промаркированными названиями этих судов, причем маркировка может быть выполнена двумя способами, а именно: маркировка всего названия либо посимвольная маркировка названия.

При использовании первого способа необходимо обучить нейронную сеть обнаружению части изображения с текстом, которое подразумевает название судна и последующей передаче этого фрагмента изображения в систему распознавания текста (OCR) — рис. 3 [14].



Рис. 3. Пример идентификации судов [14]
(зеленым цветом выделено верное распознавание, красным — ошибочное)

При использовании второго подхода нейронная сеть будет обучаться таким образом, что при поиске также будут определяться и сами символы и, соответственно, не требуется дополнительного программного обеспечения в виде системы распознавания текста. Однако данный способ нежелателен, так как возможен случай, когда один из символов на изображении не будет распознан. В качестве системы распознавания текста можно использовать *предобученные нейронные сети*, а также их готовые программные реализации с открытым исходным кодом (например, tesseract).

³ Кодекс внутреннего водного транспорта РФ. Ст. № 13 «Средства идентификации судна».

⁴ Приказ министерства транспорта РФ № 129 от 14.10.2002.

⁵ Приказ МЧС России № 566 от 15.08.2021.

⁶ Приказ МЧС России № 777 от 27.07.2023.

Определение местоположения судна. Определение местоположения судна является ключевой задачей в данной системе, для реализации которой необходимо знать как центральную точку судна, так и расположение камеры относительно этого судна. Также необходимо правильно вычислить центральную точку судна, относительно которой будут выполняться последующие измерения и расчеты. При этом необходимо учитывать, что при изменении центральной точки последующие измерения будут иметь погрешность. Учитывая, что длина судов пассажирского класса, эксплуатируемых на ВВП регионального значения, расположенных в черте г. Санкт-Петербурга, в среднем не превышает 10 м, а длина маломерных судов обычно не превышает 5 м, необходимо добиться точности в определении местоположения, по крайней мере, не менее 1 м. Причем ширина судового хода на этих ВВП составляет 6–14 м⁷. При такой точности данная система позволяет определять местоположение судна, сопоставимое с точностью штатного режима Глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) GPS/ГЛОНАСС. Ошибка в определении местоположения не будет накапливаться со временем, как, например, в бесплатформенной инерциальной навигационной системе (БИНС) ввиду того, что каждый кадр будет восприниматься ею отдельно. Однако в дальнейшем эта ошибка может повлиять на расчеты скорости движения судна и его курса.

Для определения местоположения судов можно использовать следующие способы:

- построить сетку координат, узлами которой будут являться точно известные координаты, заранее внесенные в систему;
- использовать искусные нейронные сети путем их обучения на основе данных, полученных с установленных камер, а также динамическую информацию, передаваемую в системе АИС;
- использовать несколько камер видеонаблюдения для триангуляции судна.

Каждый из данных методов имеет свои преимущества и недостатки. Главным преимуществом использования сетки координат (рис. 4) является достаточная простота в определении местоположения для точки, находящейся внутри этой сетки [15]. Однако с удалением искомой точки от камеры точность определения местоположения будет снижаться существенным образом. Расстояние, на котором точность будет приемлема, зависит от угла и высоты расположения этой камеры, а также от разницы высот между искомой точкой (судном) и камерой. При этом необходимо отметить, что нанесение координатной сетки требует значительных человеческих ресурсов и не подлежит существенной автоматизации, что является главной причиной, не позволяющей использовать данный метод на практике.

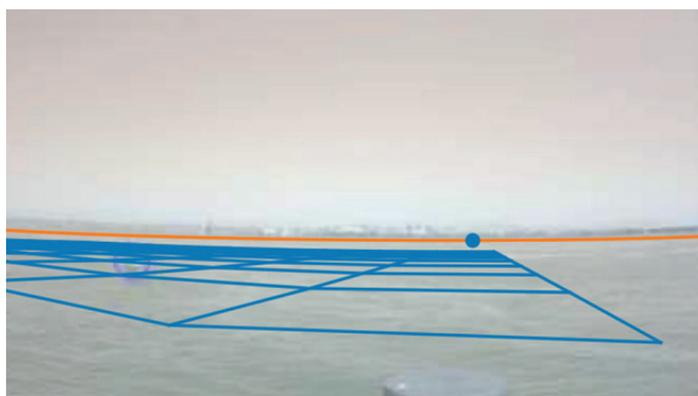


Рис. 4. Пример нанесения координатной сетки [15]

Обучение нейронных сетей для определения местоположений подразумевает, что изображение после определения искомой точки будет передаваться в нейронную сеть, а также данные с приемника АИС будут являться целевыми значениями для данной нейронной сети. Исходя из этого

⁷ Карта внутренних водных путей регионального значения в границах Санкт-Петербурга (1 : 1000) / Сост. и подгот. к изд. ФБУ «Администрация «Волго-Балт», 2023 г.; отв. ред. М. В. Завьялова. СПб.: ФБУ «Администрация «Волго-Балт». 1 атл. (33 с.).

можно сделать вывод о том, что данное решение будет являться, по сути, аналогом сетки координат. Кроме того, появляется необходимость в больших вычислительных мощностях для обучения собственной нейронной сети для каждой камеры, что позволяет значительно уменьшить скорость внедрения такой системы на практике. Также при этом нельзя быть уверенными в том, что все передатчики, установленные на частных судах, будут правильно настроены и позволят передавать валидные данные с системы GPS / ГЛОНАСС.

Пеленг наземных объектов с известными координатами для определения местоположения давно известен и применяется в судоходстве⁸. На рис. 5 приведена примерная схема определения местоположения судна с использованием пеленга двух маяков (M и M_1).

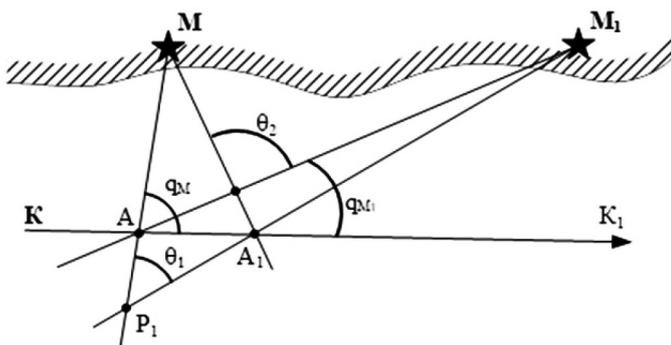


Рис. 5. Определение места по двум пеленгам

Данный способ позволяет определить местоположение судна относительно нескольких статичных объектов, при этом он отличается тем, что измерение выполняется не с самого судна, как это принято в судоходстве, а со статичных объектов, установленных на берегу (в данном случае с камер видеонаблюдения). Разбив кадр на столбцы равной ширины, можно получить относительный угол между камерой и точкой измерения.

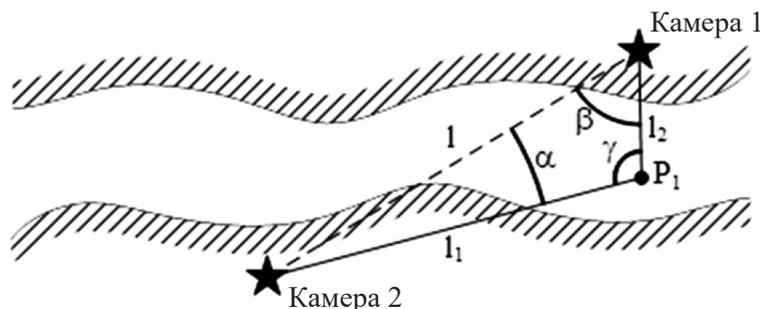


Рис. 6. Упрощенная схема определения местоположения судна

Используя рис. 6 и следующее уравнение, можно получить относительные координаты местоположения судна:

$$\frac{\sin(\alpha)}{l_2} = \frac{\sin(\beta)}{l_1} = \frac{\sin(\gamma)}{l},$$

где α — угол между камерой 1 (на противоположном берегу) и судном P_1 ; β — угол между камерой 2 и судном; γ — угол между двумя камерами; l — известное расстояние между камерой 1 и 2; l_1 — искомое расстояние между камерой 2 и судном; l_2 — искомое расстояние между камерой 1 и судном.

⁸ Ермолаев Г. Г., Андронов Л. П., Зотеев Е. С. [и др.]. Морское судоходство: учебник. 3-е изд., перераб. / М.: Транспорт, 1970. 368 с.

Затем данные координаты в переводятся в систему WGS-84 для дальнейшего использования в диспетчерских пунктах. Преимуществом данного метода является возможность достаточно точного определения как истинного, так и магнитного курса судна. Также такие вычисления являются довольно простыми, требующими значительно меньшего количества вычислительных ресурсов для решения задачи. Данный метод подразумевает только первичную быструю настройку с указанием местоположения статичных объектов, т. е. камер и в последующем не требует настройки для корректной работы, что является его несомненным преимуществом. Однако следует учесть, что данный метод также имеет ряд недостатков, одним из которых является сильная зависимость определения центра судна для последующих расчетов. Вследствие этого при значительных отклонениях центральной точки от истинной центральной точки будет возникать ошибка в определении местоположения судна. Еще одним недостатком является необходимость использования нескольких камер, направленных примерно в одну область канала или реки. Для стабильной работы требуется не менее трех камер, которые будут установлены под разными углами относительно судна, при этом разница между высотой судна и камерами не является существенной. Так, например, исходя из ранее изложенного, можно определить алгоритм работы будущей системы, разбивая исходный видеопоток и обрабатывая отдельно каждый кадр, как показано на рис. 7.

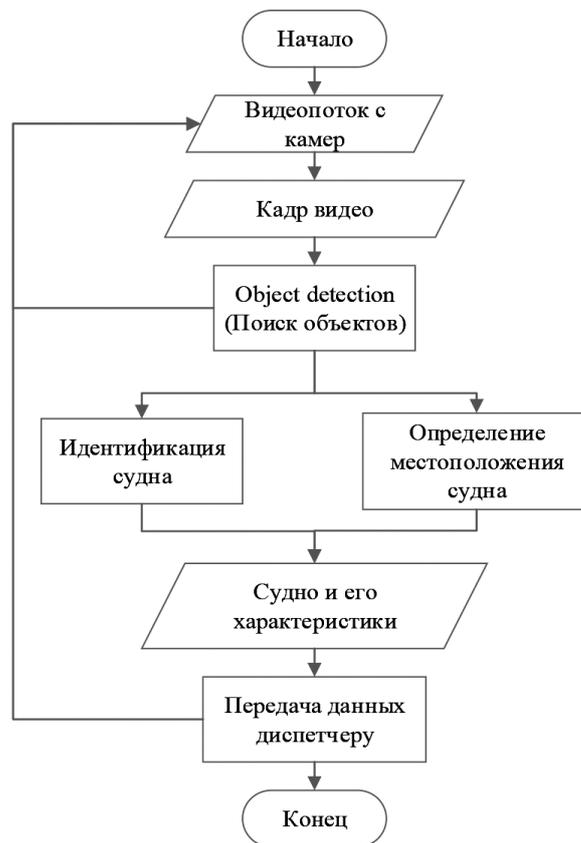


Рис. 7. Алгоритм работы мониторинга судов с использованием камер видеонаблюдения

Используя видеокادر, можно определить наличие на нем судна. В случае отсутствия судна на изображении система переходит к следующему кадру видеопотока от камеры. В противном случае кадр передается в подсистемы идентификации и определения местоположения судна. В случае системы идентификации рациональней является передача только участка изображения с найденным судном. Таким образом, можно уменьшить нагрузку на подсистему идентификации и избежать ложных срабатываний на другие тексты, которые могут находиться в зоне

видимости камеры. По окончании работы указанных подсистем формируется отчет, в который будет входить изображение (кадр), полученное с системы видеонаблюдения, название и / или регистрационный номер судна, координаты в системе WGS-84, а также другие характеристики, которые система может определить на основе имеющихся данных.

Заключение (Conclusion)

Мониторинг судов на акваториях ВВП, расположенных в границах населенных пунктов, является важной частью комплексной задачи по обеспечению заданного уровня безопасности судоходства. Развитие городских систем видеонаблюдения и технологий обработки изображений позволяют отслеживать и идентифицировать суда. Однако следует учитывать, что для выбора технологий, позволяющих решать данную задачу, необходимо учитывать результаты передовых исследований в области обработки видеоизображений.

Исходя из метрик и сложности вычислений, а также учитывая объемы кадров, полученных от камер системы видеонаблюдения, рациональным выбором является использование нейронной сети для поиска объекта на изображении (YOLOv8x), что позволит в конечном счете уменьшить объем времени, необходимого для обработки всех изображений, поступающих на сервер вычислений.

Для определения оптимального способа определения местоположения судна необходимо провести эксперименты или математическое моделирование работы в соответствии с предложенным в работе алгоритмом. Следует также учитывать, что пеленг является проверенным методом определения местоположения, однако необходимо разработать методику для использования данного метода с берега.

Кроме того, для решения задачи по определению местоположения судов крайне важным условием является количество установленных камер, а также их взаимное расположение. В случае, когда это условие не выполняется, необходимо принять меры для увеличения количества камер, а также обеспечить необходимое наложение их зон видимости в области наблюдения. При этом необходимо иметь в виду, что, по всей видимости, наилучшие точностные характеристики по определению местоположения судна могут быть получены при условии, когда угол γ близок к прямому. Однако этот угол не является фиксированным вследствие перемещения объекта наблюдения. Причем курс и скорость перемещения могут быть неравномерны. В случае, когда указанный угол достигает критических значений, может потребоваться переход на следующую пару камер. Данный вопрос требует отдельного изучения в следующей работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hyla T. Ships detection on inland waters using video surveillance system / T. Hyla, N. Wawrzyniak // IFIP International Conference on Computer Information Systems and Industrial Management. — 2019. — С. 39–49. DOI: 10.1007/978-3-030-28957-74.
2. Wawrzyniak N. Vessel detection and tracking method based on video surveillance / N. Wawrzyniak, T. Hyla, A. Popik // Sensors. — 2019. — Vol. 19. — Is. 23. — Pp. 5230.
3. Stępień G. Method of Improving Incomplete Spatial-Temporal Data in Inland Navigation, on the Basis of Industrial Camera Images — West Oder River Case Study / G. Stępień, et al. // Transport and Telecommunication. — 2022. — Vol. 23. — Is. 1. — С. 48–61. DOI: 10.2478/tj-2022-0005.
4. Горячкин Б. С. Компьютерное зрение / Б. С. Горячкин, М. А. Китов // E-scio — 2020. — № . 9 (48). — С. 317–345.
5. Гаврилов Д. А. Нейросетевой алгоритм автоматического обнаружения и сопровождения объекта интереса в видеосигнале / Д. А. Гаврилов // Шестнадцатая Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2018–2018. — С. 188–195.
6. Ерохин Д. Ю. Современные сверточные нейронные сети для обнаружения и распознавания объектов / Д. Ю. Ерохин, М. Д. Ершов // Цифровая обработка сигналов — 2018. — Т. 3. — С. 64–69.
7. Hong X. Research on multi-ship target detection and tracking method based on camera in complex scenes / X. Hong, et al. // Journal of Marine Science and Engineering. — 2022. — Vol. 10. — Is. 7. — Pp. 978. DOI: 10.3390/jmse10070978.

8. Kim K. Probabilistic ship detection and classification using deep learning / K. Kim [et al.] // *Applied Sciences*. — 2018. — Vol. 8. — Is. 6. — Pp. 936.
9. Zhao H. Embedded deep learning for ship detection and recognition / H. Zhao [et al.] // *Future Internet*. — 2019. — Vol. 11. — Is. 2. — Pp. 53.
10. Zhao P. A real-time ship detector via a common camera / P. Zhao [et al.] // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2022. — Vol. 10. — Is. 8. — Pp. 1043. DOI: 10.3390/jmse10081043.
11. Cheng S. Deep learning based efficient ship detection from drone-captured images for maritime surveillance / S. Cheng, Y. Zhu, S. Wu // *Ocean Engineering*. — 2023. — Vol. 285. — Pp. 115440.
12. Sun Y. Global Mask R-CNN for marine ship instance segmentation/ Y. Sun [et al.] // *Neurocomputing*. — 2022. — Vol. 480. — Pp. 257–270.
13. Chang Y. L. Ship detection based on YOLOv2 for SAR imagery / Y. L. Chang [et al.] // *Remote Sensing*. — 2019. — Vol. 11. — Is. 7. — Pp. 786.
14. Wawrzyniak N. Vessel identification based on automatic hull inscriptions recognition / N. Wawrzyniak, T. Hyla, I. Bodus-Olkowska // *Plos one*. — 2022. — vol. 17. — Is. 7. — Pp. e0270575. DOI: 10.1371/journal.pone.0270575.
15. Jacob, T. Marine Vessel Tracking using a Monocular Camera / T. Jacob, R. Galliera, M. Ali, S. Bagui, // *In Proceedings of the 2nd International Conference on Deep Learning Theory and Applications — DeLTA*. — Se-tubal: SciTePress, 2021. — Pp. 17–28. DOI: 10.5220/0010516000170028.

REFERENCES

1. Hyla, Tomasz, and Natalia Wawrzyniak. “Ships detection on inland waters using video surveillance system.” *IFIP International Conference on Computer Information Systems and Industrial Management*. Cham: Springer International Publishing, 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-28957-7_4.
2. Wawrzyniak, Natalia, Tomasz Hyla, and Adrian Popik. “Vessel detection and tracking method based on video surveillance.” *Sensors* 19.23 (2019): 5230.
3. Stępień, Grzegorz [et al.]. “Method of Improving Incomplete Spatial-Temporal Data in Inland Navigation, on the Basis of Industrial Camera Images—West Oder River Case Study.” *Transport and Telecommunication Journal* 23.1 (2022): 48–61. DOI: 10.2478/ttj-2022-0005.
4. Goryachkin, B. S., Kitov M. A. “Komp’yuternoye zreniye.” *E-scio* 9 (48) (2020): 317–345.
5. Gavrilov, Dmitriy Aleksandrovich. “Neyrosetevoy algoritm avtomaticheskogo obnaruzheniya i soprovozhdeniya ob’yekta interesa v videosignale.” *Shestnadsataya Natsional’naya konferentsiya po iskusstvennomu intellektu s mezhdunarodnym uchastiyem KII-2018* (2018).
6. Yerokhin, D. YU., and M. D. Yershov. “Sovremennyye svertochnyye neyronnyye seti dlya obnaruzheniya i raspoznavaniya ob’yektov.” *Tsifrovaya obrabotka signalov* 3 (2018): 64–69.
7. Hong, Xiaobin, et al. “Research on multi-ship target detection and tracking method based on camera in complex scenes.” *Journal of Marine Science and Engineering* 10.7 (2022): 978. DOI: 10.3390/jmse10070978.
8. Kim, Kwanghyun, et al. “Probabilistic ship detection and classification using deep learning.” *Applied Sciences* 8.6 (2018): 936.
9. Zhao, Hongwei [et al.]. “Embedded deep learning for ship detection and recognition.” *Future Internet* 11.2 (2019): 53.
10. Zhao, Penghui [et al.]. “A real-time ship detector via a common camera.” *Journal of Marine Science and Engineering* 10.8 (2022): 1043.
11. Cheng, Shuxiao, Yishuang Zhu, and Shaohua Wu. “Deep learning based efficient ship detection from drone-captured images for maritime surveillance.” *Ocean Engineering* 285 (2023): 115440. DOI: 10.3390/jmse10081043.
12. Sun, Yuxin, et al. “Global Mask R-CNN for marine ship instance segmentation.” *Neurocomputing* 480 (2022): 257–270.
13. Chang, Yang-Lang [et al.]. “Ship detection based on YOLOv2 for SAR imagery.” *Remote Sensing* 11.7 (2019): 786.
14. Wawrzyniak, Natalia, Tomasz Hyla, and Izabela Bodus-Olkowska. “Vessel identification based on automatic hull inscriptions recognition.” *Plos one* 17.7 (2022): e0270575. DOI: 10.1371/journal.pone.0270575.
15. Jacob., Tobias [et al.]. ‘Marine Vessel Tracking Using a Monocular Camera’. *Proceedings of the 2nd International Conference on Deep Learning Theory and Applications — DeLTA, INSTICC 2021*: 17–28. DOI: 10.5220/0010516000170028.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Беспалов Александр Павлович — аспирант
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: bespalovap@gumrf.ru

Каретников Владимир Владимирович — доктор
технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: karetnikovvv@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bespalov, Aleksandr P. — postgraduate student
Admiral Makarov State University of Maritime and
Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian
Federation

e-mail: bespalovap@gumrf.ru

Karetnikov, Vladimir V. — Dr. of Technical
Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime and
Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian
Federation

e-mail: karetnikovvv@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию: 10 сентября 2024 г.

Received: September 10, 2024.

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-749-761

MEASUREMENT OF RESIDUAL DEVIATIONS OF THE SHIP'S HULL AXIS FROM THE INITIAL POSITION

S. O. Baryshnikov, A. B. Krasiuk, V. B. Chistov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The article discusses a method for measuring deviations of the deformed axis of a ship's hull from the initial (non-deformed) position that arise with a general residual bend or deflection. The Rules of the Russian Classification Society (RCS) and the Rules of the Russian Maritime Register of Shipping (RMRS) do not have standards for assessing the main characteristics of such deformations (the maximum bend or deflection arrow). Nevertheless, this defect has a significant impact on the overall strength and reliability of the ship's hull in operation and can cause sudden failure. The presence of general residual deformations of the hull not only negatively affects the strength and reliability of the hull, but also complicates cargo operations and leads to errors in determining the amount of cargo in the tanks of tankers. The result of the research presented in this article is a new technique for measuring deviations of the hull axis of a ship with general residual deformations from its initial non-deformed state, mathematical dependencies for calculating the exact coordinates of the deformed hull axis. This will make it possible to more accurately assess the level of overall strength of the hull, and, if necessary, develop a technological process for elimination the overall residual bend (deflection). The procedure for determining the parameters of general residual deformations is further complicated by the fact that the maximum inflection (deflection) arrow obtained from the measurement results also includes an elastic component. The developed mathematical dependencies make it possible to exclude from the maximum arrow of bend (deflection) obtained as a result of measurements the elastic component caused by the load acting on the ship's hull. A device has been developed for recording deviations of the axis of a deformed ship's hull from the initial (non-deformed) position. The new measurement technique and this device will allow measurements not only when the vessel is on a slip or in a dock, but also afloat at quay wall. Due to the fact that the geometric characteristics of the section along the length of the ship's hull change, the optimal number of measured sections (5–7) in the area of the cylindrical insert is justified, with the length of each section a multiple of the frame spacing. An example is given of calculating the ordinates of the residual curved axis of the body based on the measurement results and determining the curvature in each of the deformed sections.

Keywords: total residual deformation, total residual bending, curvature of the hull section, measuring the curvature of the hull, elimination of hull curvature, strength level, bending moment.

For citation:

Baryshnikov, Sergei O., Alla. B. Krasiuk, and Valentin B. Chistov. "Measurement of residual deviations of the ship's hull axis from the initial position" *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.5 (2024): 749–761. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-749-761.

УДК 625.12:539.4

ИЗМЕРЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ ОСИ КОРПУСА СУДНА ОТ ИСХОДНОГО ПОЛОЖЕНИЯ

С. О. Барышников, А. Б. Красюк, В. Б. Чистов

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрен способ измерения отклонений деформированной оси корпуса судна от исходного (недеформированного) положения, возникающих при общем остаточном перегибе или прогибе. Отмечается,

что данный дефект может существенно снизить уровень общей прочности и надежности корпуса судна в процессе эксплуатации и явиться причиной внезапного отказа. Кроме того, наличие общих остаточных деформаций корпуса не только отрицательно влияет на прочность и надежность корпуса, но и затрудняет выполнение грузовых операций, а также приводит к погрешностям в определении количества груза в танках наливных судов. Результатами проведенного исследования являются новая методика измерения отклонений оси корпуса судна с общими остаточными деформациями от ее исходного недеформированного состояния и новые математические зависимости для вычисления точных координат деформированной оси корпуса. Эти новации позволяют более точно оценить уровень общей прочности корпуса и при необходимости разработать технологический процесс устранения общего остаточного перегиба (прогиба). Подчеркивается, что процедура определения параметров общих остаточных деформаций усложняется еще и тем, что максимальная стрелка перегиба (прогиба), полученная по результатам измерений, включает также упругую составляющую. Разработанные математические зависимости позволяют исключить из максимальной стрелки перегиба (прогиба), получаемой в результате измерений, упругую составляющую, вызванную нагрузкой, действующей на корпус судна. Разработано приспособление для фиксации отклонений оси деформированного корпуса судна от исходного (недеформированного) положения. Новая методика измерений и данное приспособление позволят выполнять измерения не только при нахождении судна на слипе или в доке, но и на плаву у причальной стенки. В связи с тем, что геометрические характеристики сечений по длине корпуса изменяются, обосновано оптимальное число измеряемых участков (5–7) в районе цилиндрической вставки при длине каждого участка, кратной рамной шпации. Дан пример определения кривизны корпуса на каждом из деформированных участков путем пересчета результатов измерений в точные ординаты положения остаточной изогнутой оси.

Ключевые слова: общая остаточная деформация, общий остаточный перегиб, искривление участка корпуса, измерение кривизны корпуса, устранение кривизны корпуса, уровень прочности, изгибающий момент.

Для цитирования:

Барышников С. О. Измерение остаточных отклонений оси корпуса судна от исходного положения // С. О. Барышников, А. Б. Красюк, В. Б. Чистов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 5. — С. 749–761. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-749-761.

Введение (Introduction)

Грузовые суда внутреннего и смешанного плавания в процессе эксплуатации и ремонта могут получить значительные общие деформации [1]–[3]. Обычно это суда 1-й группы по классификации Российского классификационного общества (РКО) с отношением длины судна L к высоте борта H более 15 ($L/H > 15$). Такие суда могут иметь общий остаточный перегиб (палуба растянута, днище сжато) с максимальной стрелкой перегиба, превышающей 800 мм [3]–[5].

Наличие в корпусе судна общих остаточных деформаций (перегиба либо прогиба) не приводит к снижению скорости судна за счет роста сопротивления воды, однако усложняет работы по подъему судна на слип (в док). Данный дефект изменяет осадку отдельных частей корпуса, не оказывая влияния на местную прочность, но может снизить уровень общей прочности. Изменение положения оси корпуса при общем остаточном прогибе или перегибе приводит к тому, что изменяется распределение сил поддержания по его длине, тогда как распределение сил веса при заданной загрузке судна остается неизменным. В итоге появляется дополнительный изгибающий момент, действующий на корпус судна. В случае, если он имеет знак, противоположный расчетному изгибающему моменту в недеформированном состоянии, последний уменьшается. При совпадении знаков итоговое значение расчетного изгибающего момента будет больше, чем у корпуса судна без общих остаточных деформаций, что уменьшит общую прочность корпуса судна. Влияние остаточного перегиба (прогиба) корпуса может сказаться на уровне его общей прочности корпуса из-за уменьшения коэффициента запаса, вызванного появлением остаточных напряжений в корпусе при возникновении перегиба (прогиба).

Целью исследования является разработка нового способа измерения отклонений деформированной оси корпуса судна от исходного положения при перегибе или прогибе судна. Для более точных измерений общих остаточных деформаций предлагается использовать приспособление оригинальной конструкции. Пересчет результатов измерений в точные ординаты положения остаточной изогнутой оси при этом будет выполняться по математическим зависимостям, позволяющим исключить упругую составляющую, вызванную нагрузкой, действующей на корпус судна.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В работах профессора Г. В. Бойцова [5], [6] предложено учитывать влияние общих остаточных деформаций на общую прочность корпуса не во всех случаях, а только тогда, когда остаточная стрелка перегиба или прогиба превышает нормативное значение:

$$f_{oH} = L \left(\frac{R_{eH}}{E} \right) \left(\frac{L}{15H} \right), \quad (1)$$

где R_{eH} — предел текучести материала палубы (комингса) или днища, МПа;
 E — модуль упругости материала, МПа;
 H — высота борта корпуса в миделевом сечении, м;
 L — расчетная длина судна, м.

При наличии у корпуса судна остаточного перегиба или прогиба, в его крайних связях появляются остаточные напряжения. Поэтому при выполнении расчетов общей прочности для корпусов, имеющих фактическую стрелку прогиба (перегиба) f_o , превышающую нормативное значение f_{oH} , согласно источнику [6], нормативный коэффициент запаса прочности следует увеличить пропорционально коэффициенту:

$$k_f = 1 + 0,1 \left[\left(f_o / f_{oH} \right) - 1 \right] \geq 1. \quad (2)$$

Согласно [6], годному техническому состоянию соответствует следующее условие общей предельной прочности:

$$M^* \geq K_{\text{годн}} k_f (M_p + \Delta M), \quad (3)$$

где M^* — фактическое значение предельного изгибающего момента, учитывающее имеющиеся в корпусе судна износы и местные остаточные деформации (при перегибе и прогибе), по абсолютному значению, кН · м;

M_p — значение изгибающего момента, принятого в качестве расчетного, кН · м;

ΔM — дополнительный изгибающий момент для судна с общими остаточными деформациями и связанным с ними изменением сил поддержания, кН · м;

$K_{\text{годн}}$ — коэффициент запаса прочности для годного технического состояния по Правилам РКО¹.

Нормативные значения коэффициентов запаса уровня общей прочности приведены в следующей таблице.

Нормативные значения коэффициентов запаса прочности

Класс судна (по Правилам РКО)	$K_{\text{годн}}$
«Л», «Р», «О», «М»	1,15
«О-ПР»	1,19
«М-ПР»	1,26
«М-СП»	1,27

В Правилах Российского морского регистра судоходства (РМРС)² вопрос о влиянии общих остаточных деформаций корпуса на его техническое состояние не рассматривается, а в Правилах Российского классификационного общества (РКО) при оценке уровня технического состояния судна с общими остаточными деформациями предлагается, независимо от величины стрелки остаточного перегиба (прогиба), не допускать к эксплуатации суда с признаками наметившегося перелома. Такой подход к нормированию дефекта (максимальной стрелки остаточного перегиба) связан со сложностью его определения. Чтобы определить остаточный общий перегиб, необходимо измерить

¹ Правила освидетельствования судов в процессе их эксплуатации (ПОСЭ). М.: РКО, 2019.

² Правила классификации и постройки морских судов. Ч. II: Корпус. СПб.: РМРС, 2019.

максимальную стрелку перегиба при заданной нагрузке, исключив из него упругую составляющую, вызванную этой нагрузкой. Вычисление упругой составляющей осложняется тем, что приходится рассчитывать упругие перемещения в брусce переменного сечения, а геометрические характеристики сечений бруса меняются по длине корпуса не только по конструктивным соображениям, но и ввиду неравномерного износа его элементов.

Способы аналитического вычисления максимальной упругой стрелки перегиба корпуса при заданной загрузке (известны эпюры поперечной силы и изгибающего момента) представлены в таблицах справочников по строительной механике, например, в [7]. Однако изменения геометрических характеристик сечений по длине корпуса сохраняются и усложняют расчет.

Ранее был разработан несколько иной подход к определению расположения остаточной изогнутой оси корпуса. Этот подход, основанный на измерениях остаточной кривизны корпуса по его участкам, нашел отражение в патенте [8] и технологической инструкции [9]. Отличие способа определения параметров общих остаточных деформаций корпуса судна, предложенного в данной статье, от подхода, изложенного в [8], состоит в следующем:

- в использовании иной методики измерений;
- в разработанных математических зависимостях для исключения упругой составляющей изгиба;
- в использовании нового приспособления для фиксации отклонений, позволяющего выполнять измерения не только при нахождении судна на слипе или в доке, но и на плавучей причальной стенке.

Прогиб изогнутой оси корпуса может быть определен по формуле

$$y_{\text{ост}}(x) = \frac{\sum_{i=1}^n C_i^{\text{ост}} (L - L_i)}{L} x - \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_i^{\text{ост}} \left(x - \left(L_i - \frac{l}{2} \right) \right)^2}{2 \Big|_{x \geq \left(L_i - \frac{l}{2} \right)}} - \frac{C_i^{\text{ост}} \left(x - \left(L_i + \frac{l}{2} \right) \right)^2}{2 \Big|_{x \geq \left(L_i + \frac{l}{2} \right)}} \right), \quad (4)$$

где $y_{\text{ост}}(x)$ — прогиб изогнутой оси корпуса, измеренный на расстоянии x от кормового перпендикуляра;

$C_i^{\text{ост}}$ — кривизна i -го участка корпуса;

l — принимаемая кратной рамной шпации длина измеряемого участка (около 6–10 м);

L — длина корпуса между перпендикулярами;

L_i — расстояние от середины i -го измеряемого участка до кормового перпендикуляра при выполнении следующих условий:

$$x \geq \left(L_i - \frac{l}{2} \right) \text{ и } x \geq \left(L_i + \frac{l}{2} \right).$$

Для получения формулы (4) использованы дифференциальные зависимости, описывающие изгиб балки. На основе данных зависимостей базируется графоаналитический способ определения перемещений. В данном случае прогиб в любой точке равен изгибающему моменту в сечении фиктивной балки под действием распределенной нагрузки, равной кривизне отдельного участка. Схема такой фиктивной балки приведена на рис. 1.

Кривизну каждого измеряемого участка корпуса можно определить различными способами: по результатам измерений стрелки прогиба на заданной длине участка палубы [10], по результатам измерений отклонений расстояния от горизонтальной плоскости до палубы [10], [11] или по измерению угла отклонения нормали от вертикали в начале и в конце изогнутого участка корпуса [11], [12]. Соотношения между измеряемыми характеристиками изогнутой оси приведены на рис. 2.

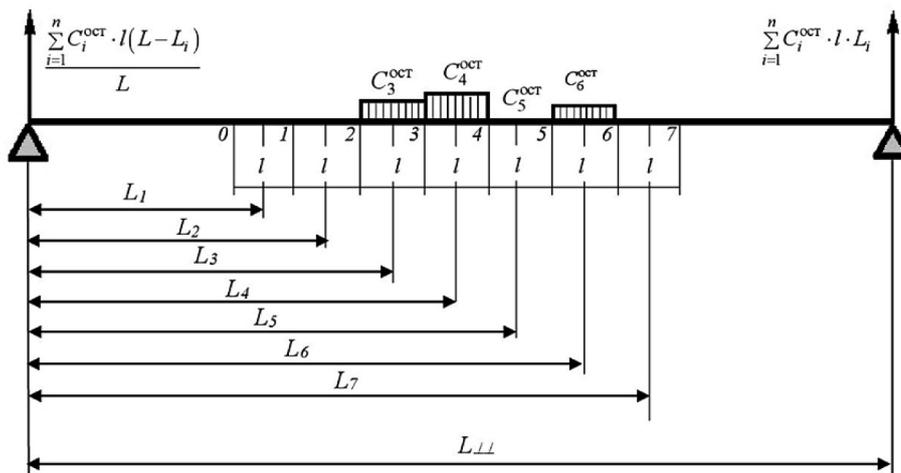


Рис. 1. Схема фиктивной балки, графически отображающая определение положения изогнутой оси корпуса

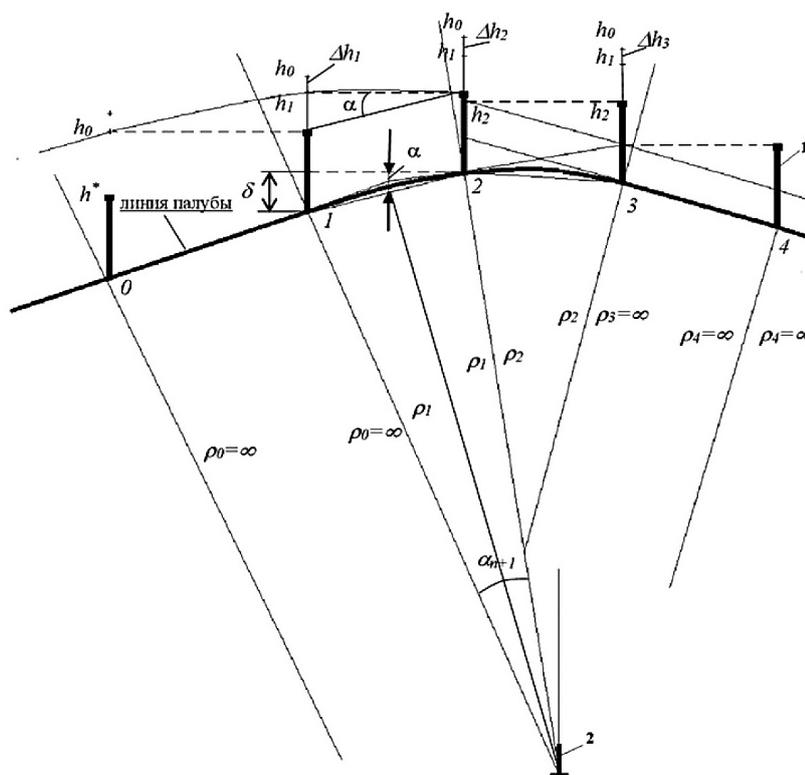


Рис. 2. Соотношения между измеряемыми характеристиками изогнутой оси корпуса:
 1 — штатив с лазерным нивелиром; h^* — расстояние от палубы до горизонтальной плоскости;
 2 — переносная стойка с приспособлением для фиксирования изменения расстояния от палубы
 в начале каждого участка измерений Δh_i

Рассчитать остаточную кривизну каждого участка корпуса, а также ординату остаточной изогнутой оси и остаточную стрелку перегиба корпуса можно с помощью фиксации изменения отклонений от горизонтали в начальной и конечной точках участка. Измерения выполняются на участках 5–7 в средней части корпуса (рис. 3). Это объясняется тем, что на крупных грузовых судах с $L/H > 15$ этот район располагается в зоне цилиндрической вставки с постоянной изгибной жесткостью, в которой из-за чрезмерных нагрузок может появиться искривление некоторых участков.

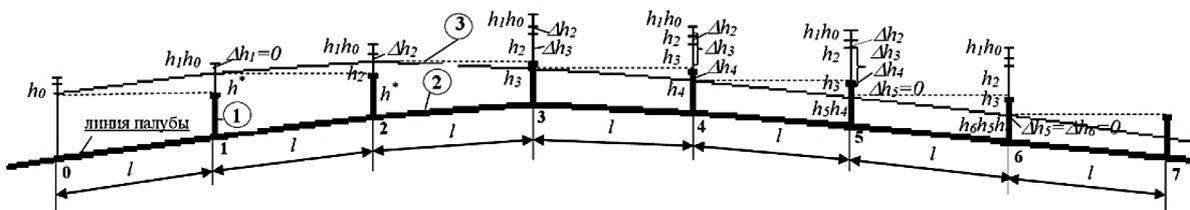


Рис. 3. Измерение отклонений деформированной оси корпуса от исходного положения:
1 — штатив с визиром (лазерный нивелир); 2 — линия палубы;
3 — фактическое расположение деформированной оси корпуса

Стойка и штатив устанавливаются последовательно в начале в конце каждого участка на пересечении бимса и карлингса. Высота штатива за все время измерений не меняется (h^* — зафиксирована). На стойке устанавливается приспособление для фиксации изменения расстояния от палубы Δh_i (рис. 4).

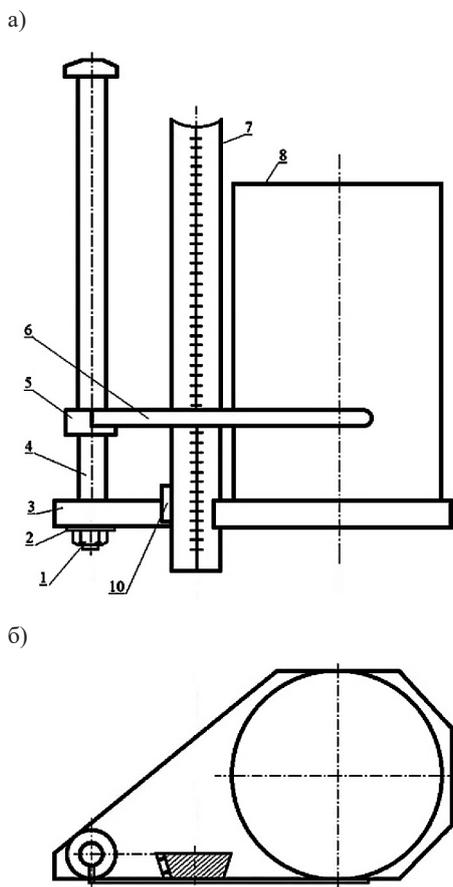


Рис. 4. Приспособление для фиксации отклонений:
а — вид спереди; б — вид сверху
Условные обозначения:

- 1 — гайка-барашек М10 (2 шт.); 2 — шайба (2 шт.);
3 — платформа (1 шт.); 4 — ось (2 шт.); 5 — ползун (1 шт.); 6 — стрелка (1 шт.);
7 — стойка нивелира (1 шт.); 8 — стакан (1 шт.); 9 — планка; 10 — клин (1 шт.)

Изменение расстояния от палубы предлагается измерять следующим образом:

1. На барабане приспособления закрепляется лист миллиметровки, по образующей барабана измеряются отклонения деформированной оси корпуса от исходного положения в натуральную величину, по окружности барабана откладывается длина участков в масштабе 1 : 500.

2. Стойка с приспособлением устанавливается в начале первого участка (точка 0 на рис. 3), а штатив с лазерным нивелиром — на конце первого участка (точка 1 на рис. 3). Приспособление на стойке устанавливается так, чтобы проекция перекрестья нивелира на барабане была началом графика расположения деформированной оси корпуса. Приспособление закрепляется на стойке 7 с помощью клина δ . Начало графика фиксируется на миллиметровке барабана, затем фиксируются расстояния от палубы h_0 и h^* .

3. Стойка с закрепленным по высоте приспособлением переносится на начало второго участка (точка 1), а барабан приспособления поворачивается по часовой стрелке на длину первого участка. Штатив с лазерным нивелиром без корректировки по высоте устанавливается в конце второго участка (точка 2 на рис. 3). На вертикали из точки 1 фиксируется проекция перекрестья лазерного нивелира, отмечается расстояние от палубы h_1 и изменение расстояния от палубы Δh_1 .

4. Процедура, описанная в пп. 3, повторяется на всех участках, а также определяются величины h_n и Δh_n .

Для вычисления максимальной стрелки перегиба, оказывающей влияние на уровень общей прочности судна и кривизны на деформированных участках, необходимой для разработки технологического процесса ремонта, устанавливается связь между кривизной на каждом участке и изменением ординаты в конце каждого из них Δh_n . С этой целью используется условие:

$$\Delta h_n = h_{n-1} - h_n. \quad (5)$$

В соответствии с рис. 2 имеем:

$$h_{n-1} = h^* + \delta; \quad h_n = h_0 - \sum_{i=1}^n \Delta h_i. \quad (6)$$

Высота хорды дуги на участке n составляет

$$f_n = \frac{C_n l_n^2}{8}, \quad (7)$$

где C_n — кривизна участка.

Угол между касательной к дуге и хордой у конца участка n равен:

$$\alpha_n^{\text{оп}} = \frac{C_n l_n}{2} = \frac{8 f_n l_n}{l_n^2} = \frac{4 f_n}{l_n}, \quad (8)$$

угол между горизонталью и хордой составляет

$$\alpha_n = \frac{8 f_n}{l_n}. \quad (9)$$

С учетом формулы (9) величина отклонения палубы от горизонтальной плоскости будет равна

$$\delta = l_n \frac{8 f_n}{l_n} = 8 f_n. \quad (10)$$

После подстановки в условие (5) значений из (6) и (10) получим

$$\Delta h_n = h_0 - \sum_{i=1}^{n-1} \Delta h_i - h^* - 8 f_n. \quad (11)$$

Из выражения (11) после преобразований получим значения кривизны на каждом участке:

$$C_n = \frac{1}{l_n} \left(h_0 - h^* - \sum_{i=1}^n \Delta h_i \right). \quad (12)$$

В качестве примера далее приведены результаты вычислений координат деформированной оси корпуса, полученные на основе измерений Δh . Рассмотрено пять вариантов для судна длиной $L_{\perp\perp} = 140$ м с длиной цилиндрической вставки 70 м. В каждом случае был выполнен расчет ординат по формулам:

$$h_0 = \frac{L_0}{L_{\perp\perp}} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta h_i}{l_i} (L_{\perp\perp} - (L_i - 0,5l_i)); \quad (13)$$

$$h_n = \frac{L_{\perp\perp} - L_n}{L_{\perp\perp}} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta h_i}{l_i} (L_{\perp\perp} - (L_i - 0,5l_i)). \quad (14)$$

Вариант 1

$L_0 = 35$ м	$\Delta h_0 = 0$	$h_0 = \frac{35}{140} \left(\frac{5}{10} \cdot 100 + \frac{2}{10} \cdot 90 + \frac{0}{10} \cdot 80 + \frac{3}{10} \cdot 70 + \frac{2}{10} \cdot 60 + \frac{2}{10} \cdot 50 \right) =$
$L_1 = 45$ м	$\Delta h_1 = 5$ мм	
$L_2 = 55$ м	$\Delta h_2 = 2$ мм	$= \frac{35}{140} (50 + 18 + 0 + 21 + 12 + 10) = 27,75$ мм
$L_3 = 65$ м	$\Delta h_3 = 0$	$h_n = \frac{140 - 95}{140} \left(\frac{5}{10} \cdot 40 + \frac{2}{10} \cdot 50 + \frac{0}{10} \cdot 60 + \frac{3}{10} \cdot 70 + \frac{2}{10} \cdot 80 + \frac{2}{10} \cdot 90 \right) =$
$L_4 = 75$ м	$\Delta h_4 = -3$ мм	
$L_5 = 85$ м	$\Delta h_5 = -2$ мм	$= \frac{45}{140} (20 + 10 + 21 + 16 + 18) = 27,32$ мм
$L_6 = 95$ м	$\Delta h_6 = -2$ мм	
$L_7 = 105$ м	$\Delta h_7 = 0$	

Вариант 2

$L_0 = 35$ м	$\Delta h_0 = 0$	$h_0 = \frac{35}{140} \left(\frac{15}{10} \cdot 100 + \frac{10}{10} \cdot 90 + \frac{5}{10} \cdot 80 + \frac{0}{10} \cdot 70 + \frac{0}{10} \cdot 60 + \frac{15}{10} \cdot 50 + \frac{15}{10} \cdot 40 \right) =$
$L_1 = 45$ м	$\Delta h_1 = 15$ мм	
$L_2 = 55$ м	$\Delta h_2 = 10$ мм	$= \frac{35}{140} (150 + 90 + 40 + 0 + 75 + 60) = 103,75$ мм
$L_3 = 65$ м	$\Delta h_3 = 5$ мм	$h_n = \frac{140 - 95}{140} \left(\frac{15}{10} \cdot 40 + \frac{10}{10} \cdot 50 + \frac{5}{10} \cdot 60 + \frac{0}{10} \cdot 70 + \frac{0}{10} \cdot 80 + \frac{15}{10} \cdot 90 + \frac{15}{10} \cdot 100 \right) =$
$L_4 = 75$ м	$\Delta h_4 = 0$	
$L_5 = 85$ м	$\Delta h_5 = 0$	$= \frac{45}{140} (60 + 50 + 30 + 135 + 150) = 136,6$ мм
$L_6 = 95$ м	$\Delta h_6 = 15$ мм	
$L_7 = 105$ м	$\Delta h_7 = 15$ мм	

Вариант 3

$L_0 = 35$ м	$\Delta h_0 = 0$	$h_0 = \frac{35}{140} \left(\frac{20}{10} \cdot 100 + \frac{15}{10} \cdot 90 + \frac{5}{10} \cdot 80 + \frac{0}{10} \cdot 70 + \frac{0}{10} \cdot 60 + \frac{15}{10} \cdot 50 + \frac{0}{10} \cdot 40 \right) =$
$L_1 = 45$ м	$\Delta h_1 = 20$ мм	
$L_2 = 55$ м	$\Delta h_2 = 15$ мм	$= \frac{35}{140} (200 + 135 + 40 + 0 + 75 + 0) = 112,5$ мм
$L_3 = 65$ м	$\Delta h_3 = 5$ мм	$h_n = \frac{140 - 95}{140} \left(\frac{20}{10} \cdot 40 + \frac{15}{10} \cdot 50 + \frac{5}{10} \cdot 60 + \frac{0}{10} \cdot 70 + \frac{0}{10} \cdot 80 + \frac{15}{10} \cdot 90 + \frac{0}{10} \cdot 100 \right) =$
$L_4 = 75$ м	$\Delta h_4 = 0$	
$L_5 = 85$ м	$\Delta h_5 = 0$	$= \frac{45}{140} (80 + 75 + 30 + 135) = 102,8$ мм
$L_6 = 95$ м	$\Delta h_6 = 15$ мм	
$L_7 = 105$ м	$\Delta h_7 = 0$ мм	

Вариант 4

$L_0 = 35$ м	$\Delta h_0 = 0$	$h_0 = \frac{35}{140} \left(\frac{40}{10} \cdot 100 + \frac{20}{10} \cdot 90 + \frac{5}{10} \cdot 80 + \frac{0}{10} \cdot 70 + \frac{0}{10} \cdot 60 + \frac{35}{10} \cdot 50 + \frac{0}{10} \cdot 40 \right) =$ $= \frac{35}{140} (400 + 180 + 40 + 0 + 175 + 0) = 198,75 \text{ мм}$
$L_1 = 45$ м	$\Delta h_1 = 40$ мм	
$L_2 = 55$ м	$\Delta h_2 = 20$ мм	$h_n = \frac{140 - 95}{140} \left(\frac{40}{10} \cdot 40 + \frac{20}{10} \cdot 50 + \frac{5}{10} \cdot 60 + \frac{0}{10} \cdot 70 + \frac{0}{10} \cdot 80 + \frac{35}{10} \cdot 90 + \frac{0}{10} \cdot 100 \right) =$ $= \frac{45}{140} (160 + 100 + 30 + 315) = 194,46 \text{ мм}$
$L_3 = 65$ м	$\Delta h_3 = 5$ мм	
$L_4 = 75$ м	$\Delta h_4 = 0$	
$L_5 = 85$ м	$\Delta h_5 = 0$	
$L_6 = 95$ м	$\Delta h_6 = 35$ мм	
$L_7 = 105$ м	$\Delta h_7 = 0$ мм	

Вариант 5

$L_0 = 35$ м	$\Delta h_0 = 0$	$h_0 = \frac{35}{140} \left(\frac{70}{10} \cdot 100 + \frac{40}{10} \cdot 90 + \frac{20}{10} \cdot 80 + \frac{0}{10} \cdot 70 + \frac{50}{10} \cdot 60 + \frac{0}{10} \cdot 50 + \frac{0}{10} \cdot 40 \right) =$ $= \frac{35}{140} (700 + 320 + 160 + 300) = 370,0 \text{ мм}$
$L_1 = 45$ м	$\Delta h_1 = 70$ мм	
$L_2 = 55$ м	$\Delta h_2 = 40$ мм	$h_n = \frac{140 - 95}{140} \left(\frac{70}{10} \cdot 40 + \frac{40}{10} \cdot 50 + \frac{20}{10} \cdot 60 + \frac{0}{10} \cdot 70 + \frac{50}{10} \cdot 80 + \frac{0}{10} \cdot 90 + \frac{0}{10} \cdot 100 \right) =$ $= \frac{45}{140} (280 + 200 + 120 + 400) = 321,42 \text{ мм}$
$L_3 = 65$ м	$\Delta h_3 = 20$ мм	
$L_4 = 75$ м	$\Delta h_4 = 0$	
$L_5 = 85$ м	$\Delta h_5 = -50$ мм	
$L_6 = 95$ м	$\Delta h_6 = 0$ мм	
$L_7 = 105$ м	$\Delta h_7 = 0$ мм	

На рис. 5 показаны результаты измерений, зафиксированные на барабане навесного приспособления на участках судна в зоне цилиндрической вставки. За пределами этой зоны корпус не изгибается и его остаточная изогнутая ось прямолинейна. Остаточная изогнутая ось искривлена не на всех участках графика изображенного на миллиметровке барабана, а только там, где в конце участка $\Delta h_i \neq 0$.

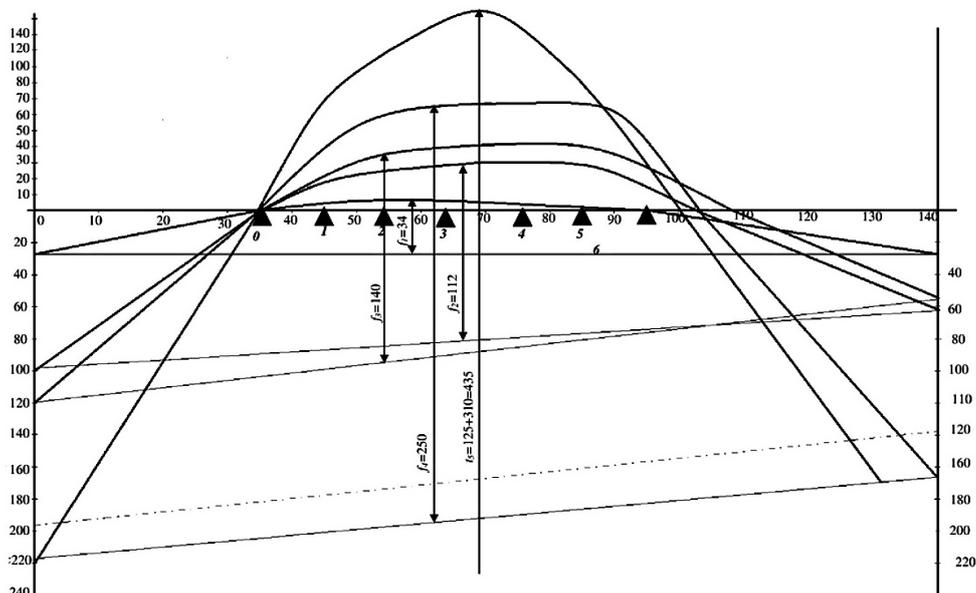


Рис. 5. Результаты измерения остаточной изогнутой оси корпуса

График на барабане показывает значения ординат изогнутой оси от линии, соединяющей начало 1-го участка и конец последнего искривленного участка. Начальная ось для ординат будет проходить по линии, соединяющей на графике две точки, у которых значения ординат h_0 и h_n вычислены по формулам (13) и (14) соответственно. Таким образом, на графике, снятом с барабана приспособления, зафиксированы значения максимального перегиба (прогиба) также вне деформированного участка, кривизна которых определяется по формуле (12). Максимальное значение ординаты изогнутой оси можно определить по формуле (5), используя для этого значение h , приведенное на рис. 5.

Предлагаемые способ и инструментарий для измерения позволяют достаточно точно, просто и наглядно определять параметры остаточной изогнутой оси корпуса, необходимые для оценки его технического состояния и последующего устранения общей остаточной деформации при ремонте.

Результаты и их обсуждение (Results and Discussions)

В результате выполненного исследования получен простой, удобный и достоверный способ определения параметров деформированной оси корпуса при общем остаточном перегибе или прогибе. Точное определение параметров общих остаточных деформаций корпуса является актуальной задачей в особенности для крупных (длиной 100 м и более) речных судов и судов смешенного *река-море* плавания, остаточные толщины крайних связей корпуса которых существенно меньше, чем у аналогичных морских судов. Такие суда имеют значительный средний возраст, что приводит довольно часто к возникновению общих остаточных деформаций. Предложенный инструментарий позволяет измерять максимальные значения стрелок перегиба (прогиба) как в целях контроля уровня общей прочности, так и с целью разработки технологического процесса устранения данного дефекта.

Изучением вопросов измерения параметров остаточного перегиба или прогиба корпуса в целом, занимались ведущие специалисты отрасли: С. Н. Гири́н, Т. А. Кузнецова [12], Т. А. Исаева [13], Г. В. Бойцов [14], П. А. Бимбереков [15], Е. Г. Бурми́стров и А. М. Уласов [16]. О необходимости нормирования значений стрелок перегиба (прогиба), в соответствии с Правилами РКО, свидетельствуют результаты исследования, выполненного С. Н. Гириным в рамках отчета о НИР [17].

Отличием настоящего исследования от работ других авторов является доступный способ измерения остаточных стрелок перегиба корпуса, предложенное приспособление для фиксации отклонений фактического положения оси корпуса от исходного (недеформированного) положения, а также использование приведенных в работе математических зависимостей для исключения упругой составляющей изгиба и расчета параметров деформированной оси корпуса.

Заключение (Conclusion)

Вопросами измерения, оценки и устранения имеющихся в корпусе судна общих остаточных деформаций специалисты ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова занимаются достаточно давно. Опыт изучения данного вопроса позволил:

- создать приспособление для фиксации отклонений настила палубы деформированного корпуса судна от его исходного положения;
- разработать методику вычисления точных координат фактического положения оси корпуса относительно исходного (недеформированного) положения;
- обосновать необходимое число измеряемых участков в зависимости от длины корпуса судна.

Доступность и простота предложенного способа определения параметров общих остаточных деформаций корпуса судна по результатам измерений подтверждена выполненным контрольным примером.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карклина Т. О. Технологический методы стабилизации метрологических характеристик танкеров: диссертация на соискание уч. степени канд. техн. наук; специальность: 05.08.04: Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства / Т. О. Карклина. — Л.: СПГУВК, 1991. — 155 с.

2. Барышников С. О. Общие остаточные деформации корпусов судов / С. О. Барышников, Т. О. Карклина // Вестник ИНЖЭКОНа. Серия: Технические науки. — 2010. — № 8. — С. 124–128. — EDN NCDTCF.
3. Барышников С. О. Надежность корпусов судов с общими остаточными деформациями / С. О. Барышников, Т. О. Карклина, В. Б. Чистов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 519–533. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-519-533. — EDN TVJHJ.
4. Карклина Т. О. Повышение точности измерения остаточного перегиба корпуса судна / Т. О. Карклина, А. В. Павлов, В. Б. Чистов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4(32). — С. 109–118. — EDN UDJUUR.
5. Бойцов Г. В. Анализ возможных причин появления общих остаточных деформаций корпуса: Отчет по договору № ЦРП-05–31–07 / Руковод. д-р техн. наук, проф. Г. В. Бойцов. — СПб., 2005. — 48 с.
6. Бойцов Г. В. Анализ и оценка остаточных деформаций корпусов судов смешанного плавания при пониженных запасах устойчивости их продольного набора / Г. В. Бойцов, А. В. Александров, О. С. Анкудинов // Труды Центрального научно-исследовательского института им. академика А. Н. Крылова. — 2006. — № 28(312). — С. 16–23. — EDN JKGXDN.
7. Бойцов Г. В. Справочник по строительной механике корабля / Г. В. Бойцов, О. М. Палий, В. А. Постнов, В. С. Чувиковский — Л.: Судостроение, 1982. — 320 с.
8. Патент № 2435149 С1, Российская Федерация, МПК G01M 5/00. Способ определения остаточного продольного изгиба корпуса судна / С. О. Барышников, Т. О. Карклина, В. Б. Чистов; заяв. «Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций». — № 2010106960/28; заявл. 24.02.2010; опубл. 27.11.2011, Бюл. № 33. — 12 с. — EDN ANEVFR.
9. Технологическая инструкция по устранению остаточного перегиба корпусов судов / ФГОУ ВПО СПГУВК / Рук. С. О. Барышников, отв. исп.: Т. О. Карклина, В. Б. Чистов. Согласов. ФГУ Российский Речной Регистр. Письмо 07–06–450 от 21.02.2012. — СПб., 2011. — 201 с.
10. Барышников С. О. Научные основы технологии восстановления общей прочности корпуса судна при ремонте / дис. ... д-ра техн. наук: 05.08.04: Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства / Сергей Олегович Барышников. — Астрахань: АГТУ, 2011. — 421 с. — EDN SUNSSH.
11. Барышников С. О. Надежность механизмов и корпусов судов: монография / С. О. Барышников, Л. И. Погодаев, В. Б. Чистов. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова, 2018. — 251 с.
12. Гирин С. Н. Упругопластическое деформирование корпуса судна при нагрузках, близких к предельным / С. Н. Гирин, Т. А. Кузнецова // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2018. — № 2 (Спецвыпуск). — С. 33–40. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-33-40. — EDN YQZQIN.
13. Гирин С. Н. Предельное состояние сжато-изогнутого ребра судового корпуса / Гирин С. Н., Исаева Т. А. // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2020. — № 1 (Спецвыпуск). — С. 24–29. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-1-S-I-24-27. — EDN REYSLZ.
14. Бойцов Г. В. Разработка предложений и расчетных зависимостей для учета остаточных прогибов (перегибов) при расчетах общей прочности, а также мероприятий, ограничивающих их появление: отчет по договору № ЦРП-05-31-07 (этап 2). / рук. д. т.н., проф. Г. В. Бойцов. — СПб., 2005. — 56 с.
15. Пат. № 2298162 С1 Российская Федерация, МПК G01M 5/00. Способ определения общих остаточных деформаций корпусов транспортных и / или стояночных средств / П. А. Бимбереков; Заяв. и патентообл. П. А. Бимбереков — № 2006107268/28; заявл. 09.03.2006; опубл. 27.04.2007, Бюл. № 12. — 6 с. — EDN CTWSDN.
16. Уласов А. М. Способ определения общих остаточных деформаций корпусов транспортных и / или стояночных средств д вероятностной оценки остаточного ресурса корпуса судна и его элементов / А. М. Уласов, Е. Г. Бурмистров // Речной транспорт (XXI век). — 2021. — № 2. — С. 44–48.
17. Гирин С. Н. Нормирование остаточных перегибов корпусов судов. Обоснование ограничений, вводимых Речным Регистром на величину максимальных остаточных деформаций общего перегиба корпусов судов: отчет по договору № 143/17/31/09/1701/ВГУВТ / Руковод. канд. техн. наук, проф. С. Н. Гирин. — Н. Новгород, 2018. — 79 с.

REFERENCES

1. Karklina, T. O. Technological methods for stabilizing the metrological characteristics of tankers. PhD diss. SPb: SPGUVK. 1991.

2. Baryshnikov, S. O., Karklina, T. O. “Genera residual deformations of ship hulls.” *Vestnik INZHEKONA. Seria: Tekhnicheskkiye nauki* 8 (2010): 124–128.
3. Baryshnikov, S. O., Karklina, T. O., Chistov, V. B. “Reliability of ship hulls with general residual deformations.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 519–533. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-519-533.
4. Karklina, T. O., Pavlov, A. V. and Chistov, V. B. “Improving the accuracy of measuring the residual bend of the ship’s hull.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(32) (2015): 109–118.
5. Boytsov G. V. “Analysis of possible causes of the appearance of general residual deformations of the hull” // *Otchet po dogovoru № TSRP-05–31–07/ ruk. d. t.n., professor G. V. Boytsov.* — SPb. 2005. — 48 s.
6. Boytsov, G.V., Aleksandrov, A.V., Ankudinov, O.S. “Analysis and assessment of residual deformations of the hulls of mixed navigation vessels with reduced stability margins of their longitudinal framing.” *Trudy tsentral'nogo nauchno-issledovatel'skogo instituta im. Akademika A. N. Krylova* 28 (2006): 16–23.
7. Boytsov, G. V., Paliy O. M., Postnov, V. A., Chuvikovskiy, V. S. *Handbook of ship structural mechanics.* Leningrad: *Izd-vo Sudostroyeniye.* 1982.
8. Baryshnikov, S. O., Karklina, T.O., Chistov, V.B. *RU 2 435 149 C1, IPC G 01 M 5/60.* A method for determining the residual total bending of a ship’s hull. Russian Federation, assignee. Publ. 27 October 2011.
9. *Technological instruction for eliminating residual bending of ship hull's.* / FGOU VPO SPGUVK / ruk. S. O. Baryshnikov, otv. isp.: T. O. Karklina, V. B. Chistov. Soglasov. FGU Rossiyskiy Rachnoy Registr. Pis'mo 07–06–450 ot 21.02.2012. — SPb. 2011. — 201 s.
10. Baryshnikov, S. O. Scientific basis of technology for restoring the overall strength of a ship’s hull during repairs. Grand PhD diss. Astrakhan: AGTU, 2011.
11. Baryshnikov, S. O., Pogodayev, L. I., Chistov, V. B. *Reliability of mechanisms and ship hulls.* SPb.: *Izd-vo GUMRF im. Admiral S. O. Makarova.* 2018.
12. Girin, S. N., Kuznetsova, T. A. “Elastoplastic deformation of the ship’s hull under loads close to the maximum.” *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra Spetsvypusk 2.* (2018): 33–40. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-33-40.
13. Girin, S. N., Isaeva, T. A. “Limit state of a compressed-bent rib of a ship’s hull.” *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra Spetsvypusk 1.* (2020): 24–29. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-1-S-I-24-27.
14. *Boytsov, G. V.* “Development of proposals and design dependencies to take into account residual deflections (bend) when calculating the overall strength, as well as measures to limit their occurrence”/ Contract report № TSRP-05–31–07 (etap2). ruk. d. t.n., professor G. V. Boytsov. — SPb, 2005. — 56 s.
15. Bimberekov, P. A. *RU 2 298 162 C1, IPC G 01 M 5/00.* Method for determining the general residual deformations of the hulls of transport and/or parking vessels Russian Federation, assignee. Publ. 27 April 2007.
16. Ulasov, A. M. and Burmistrov, E.G. “Method of probabilistic assessment of the residual life of a ship’s hull and it’s elements.” *Rechnoy transport (XXI vek)* 2 (2021): 44–48.
17. Girin, S. N. “Standartization of residual bends of ship hulls. Justification of the restrictions introduced by the River Register on the value of maximum residual deformations of the general bending of ship hulls”/ Contract report № 143/17/31/09/1701/VGUVT ruk. D.t.n., prof. S. N. Girin. — N.Novgorod, 2018. — 79 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Барышников Сергей Олегович —
доктор технических наук, профессор, ректор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: rector@gumrf.ru

Красюк Алла Борисовна —
кандидат технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: krazyuk_a_b@mail.ru, kaf_mnt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Baryshnikov, Sergei O. —
Dr. of Technical Sciences, professor, rector
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: rector@gumrf.ru

Krasiuk, Alla B. —
PhD, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: krazyuk_a_b@mail.ru, kaf_mnt@gumrf.ru

Чистов Валентин Борисович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: chistovvb@gumrf.ru

Chistov, Valentin B. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: chistovvb@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 15 августа 2024 г.
Received: August 15, 2024.*

IMPROVING THE RELIABILITY OF POWER DRIVES OF MARINE AND CRANE EQUIPMENT BY SCHEMATIC LAYOUT METHODS

A. N. Ivanov, E. V. Matveeva

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

This article is devoted to the problem of increasing the reliability of special power drives designed exclusively on the basis of cylindrical gear ordinary and single-row planetary mechanisms that allow you to create multifunctional, high-tech products endowed with equalizing properties that eliminate overestimation of the mass of nodes and the associated mass of metal structures, provide the product with high technical, economic and operational performance. Complex composite gears with a differential are considered, in which all links are movable, which allows it to work with various functions of branching power flows: distribute movement to several consumers; summarize several independent movements requiring rotation of their input links in one or different directions; create systems with superimposed adjusting motion and systems with stepless regulation, as well as solve other tasks. The main attention is paid to torque distributors, which, with one leading link, have several driven links. Distributors with two slave links are most often used in marine and crane equipment. The development of the theory of transmission of such devices has its own characteristics and is impossible without taking into account their energy-kinematic state. The properties of the differential mechanism are formulated and analytical dependencies are built on their basis, with the help of which it is possible to create a distributor with specified kinematic, power, and energy parameters, taking into account the schematic layout requirements. To increase the reliability of distributors with a high value of the total gear ratio, solutions have been developed that simplify the design of the power drive; for structures providing a given misaligned arrangement of the drive shafts, solutions have been proposed that exclude the presence of open gears. All this taken together will contribute to the development of scientific approaches to the design and design of modern models of power drives.

Keywords: power drive, differential, reliability, gear-driven ordinary and single-row planetary mechanisms, movement mechanism, rotation mechanism, departure change mechanism.

For citation:

Ivanov Anatoly N. and Elena V. Matveeva. "Improving the reliability of power drives for marine and crane equipment by schematic layout methods." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.5 (2024): 762–774. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-762-774.

УДК 621.830.62

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИЛОВЫХ ПРИВОДОВ СУДОВОЙ И КРАНОВОЙ ТЕХНИКИ СХЕМНО-КОМПОНОВОЧНЫМИ МЕТОДАМИ

А. Н. Иванов, Е. В. Матвеева

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Настоящая статья посвящена исследованию проблемы повышения надежности специальных силовых приводов, конструируемых исключительно на базе цилиндрических зубчатых рядовых и однорядных планетарных механизмов, позволяющих создавать многофункциональные, высокотехнологичные изделия, имеющие уравнивательные свойства, дающие возможность устранить завышение массы узлов и сопряженной с ней массы металлоконструкции, а также обеспечивающие высокие технико-экономические и эксплуатационные показатели изделия. Рассмотрены сложные составные передачи с дифференциалом, у которого все звенья подвижны, что позволяет им работать с различными функциями разветвления потоков мощности: раздавать движение нескольким потребителям; суммировать несколько независимых движений, требующих вращения своих входных звеньев в одну или разные стороны; создавать системы с наложенным регулировочным движением и системы с бесступенчатым регулированием, а также решать другие задачи. Основное внимание уделено распределителям момента, которые при одном ведущем звене

имеют несколько ведомых звеньев. Отмечается, что наиболее часто в судовой и крановой технике используются распределители с двумя ведомыми звеньями. Разработка вопросов теории передач подобных устройств имеет особенности и невозможна без учета их энергокинематического состояния. Сформулированы свойства дифференциального механизма и на их основе построены аналитические зависимости, с помощью которых можно создать распределитель с заданными кинематическими, силовыми, энергетическими параметрами с учетом схемно-компоновочных требований. Для повышения надежности распределителей с большим значением общего передаточного отношения разработаны решения, упрощающие конструкцию силового привода. Для конструкций, обеспечивающих заданное несоосное расположение приводных валов, предложены решения, исключающие наличие открытых передач и способствующие разработке конструкций современных образцов силовых приводов.

Ключевые слова: силовой привод, дифференциал, надежность, зубчатые рядовые механизмы, однорядные планетарные механизмы, механизм передвижения, механизм поворота, механизм изменения вылета.

Для цитирования:

Иванов А. Н. Повышение надежности силовых приводов судовой и крановой техники схемно-компоновочными методами / А. Н. Иванов, Е. В. Матвеева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 5. — С. 762–774. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-762-774.

Введение (Introduction)

В судовой и крановой технике нашли применение силовые приводы, построенные на основе планетарно-дифференциальных передач. В частности, применение распределителей момента для привода от одного двигателя двух соосных винтов, вращающихся в противоположных направлениях на одном гребном валу в главных судовых установках, позволило сократить расход топлива на судах на 16 % [1]. Обеспечивая судну требуемую нагрузочную способность и быстроходность, подобные приводы в связи с интенсивным ростом грузоподъемности и скорости судов дают возможность увеличить мощность энергетических установок и объем перевалки грузов через морские и речные торговые порты России. Решать эту задачу можно сокращением времени простоя транспортных средств под погрузочно-разгрузочными работами путем внедрения автоматизированных систем [2]. В данной работе ее решение предлагается иным, а именно изменением конструктивных связей в силовом приводе перегрузочной техники.

Несмотря на очевидные преимущества новых схемно-компоновочных решений механизмов они не нашли должного понимания у разработчиков. Объяснить это можно прежде всего нежеланием отказаться от традиционных решений переходом на новые схемно-компоновочные решения и, что менее вероятно, определенной сложностью известных методик. Разработке методик проектирования конструкций, построенных на основе планетарно-дифференциальных механизмов исследуемого типа, посвящены многие работы. В рассматриваемой области следует отметить прежде всего известные работы проф. М. А. Крейнса, В. Н. Прокофьева, С. Н. Кожевникова. На их основе проф. А. Ф. Крайнев обобщил проектирование разветвленных передач [3], основанное на графических методах. В последние годы появились работы, посвященные исследованию общих свойств отдельно взятого дифференциального механизма [4]. В работе [5] исследована возможность применения дифференциала в качестве зубчатого вариатора, который должен, по мнению авторов исследования, не только распределять движение, но и плавно изменять крутящий момент на выходном валу привода. Изучению кинематических возможностей отдельно взятого замкнутого зубчатого дифференциального механизма с цилиндрическими колесами посвящена работа [6].

В данной статье выполнены исследования в области теории передач и предложена методика проектирования дифференциальных передач, основанная на свойствах планетарного механизма с тремя подвижными основными звеньями. В качестве дифференциала предпочтение, по известным причинам, отдано однорядному планетарному механизму с одновенцовыми сателлитами, несмотря на то, что для него не характерны большие, а также близкие к нулю или единице передаточные отношения. Эксцентричные планетарные механизмы [7], [8] как элементы дифференциальных передач в технике исследуемого типа не применяются.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В отечественной перегрузочной технике применению силовых приводов уделяется недостаточное внимание несмотря на то, что их использование позволяет не только уменьшить размеры и общую массу привода и сопряженных с ним узлов, но и прежде всего повысить его надежность и энергоемкость. Так, на рис. 1, *а, б* показана конструкция, построенная на основе конического дифференциала, который исключает проскальзывание ходовых колес в механизме передвижения крана, тем самым резко уменьшая износ ходовых колес из-за различия в средних значениях радиусов катания [9], [10]. За счет дифференциала автомобильного типа обеспечивается равенство окружных усилий на ходовых колесах, а необходимое соотношение скоростей ходовых колес, движущихся по рельсам, обуславливает внешняя связь в виде подкранового пути. Вызванное особенностями компоновки несоосное расположение валов ходовых колес и двигателя осуществляется за счет включения в привод дополнительной зубчатой пары, установленной между двигателем и дифференциалом.

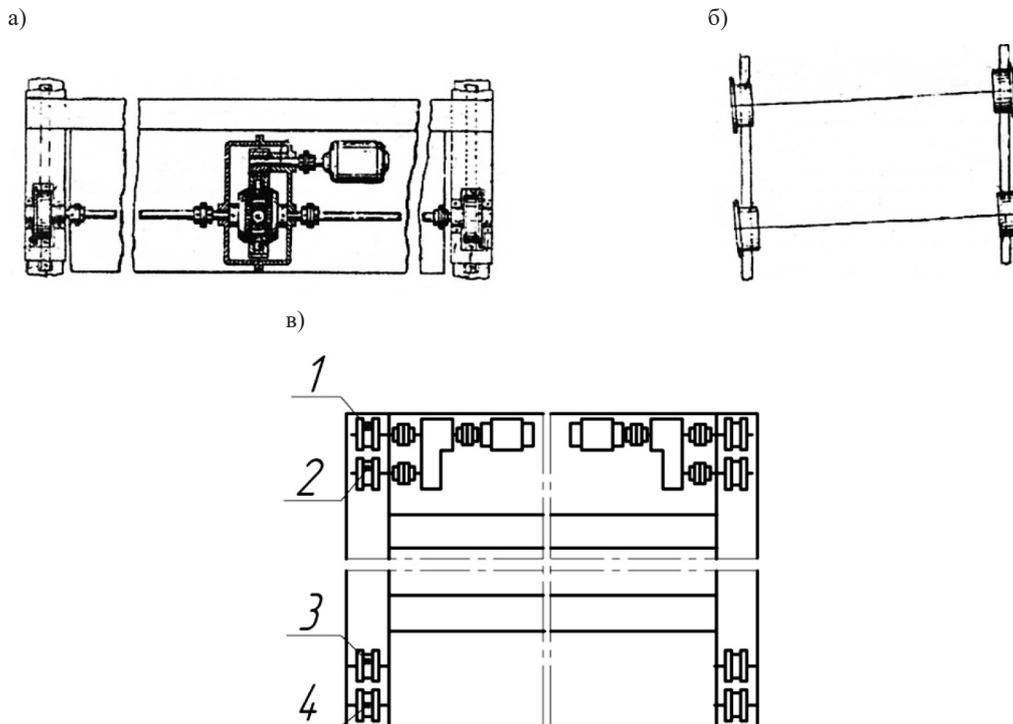


Рис. 1. Механизмы передвижения крана:

- а* — схема привода с коническим дифференциалом;
- б* — схема перекоса моста с ребордами у колес с одной внешней стороны;
- в* — схема привода с цилиндрическим дифференциалом:
- 1, 2 — приводные ходовые колеса; 3, 4 — холостые ходовые колеса

Ввиду того, что конический дифференциал отличается сложностью монтажа и недостаточной прочностью узлов с целью повышения надежности современных образцов силовых приводов в качестве дифференциала предпочтение получил однорядный планетарный механизм с одновенцовыми сателлитами, несмотря на то, что для него не характерны большие, а также близкие к нулю или единице передаточные отношения, но при этом он формирует наиболее простое и надежное в конструктивном отношении устройство.

Новое схемно-конструктивное решение механизма передвижения показано на рис. 1, *в*. В приводе с одним двигателем находятся два ходовых колеса 1 и 2 с равными между собой вращающимися моментами при одинаковом, обусловленном рельсовыми путями, направлении вращения выходных валов распределителя [11]. Приведение в движение двух ходовых колес вызвано динамикой разгона, а исключение из конструкции открытых зубчатых пар — необходимостью повышения надежности привода. Несосоосное расположение двух приводных валов с заданным расстоянием

между их осями, вызванное компоновочными условиями, решено установкой в конструкции привода специального симметричного цилиндрического дифференциала.

Аналогичный специальный симметричный цилиндрический дифференциал использован в распределителе момента механизма поворота перегрузочного крана, в котором энергия от одного двигателя идет к двум выходным валам равными потоками. Шестерни с числом зубьев z_{10} , установленные на валах, входят в зацепление с колесом z_{20} опорно-поворотного устройства. Конструкция позволила встроить редуктор в платформу крана и тем самым расширить монтажное пространство машинной кабины, а также повысить надежность вследствие передачи нагрузки двумя зацеплениями (рис. 2).

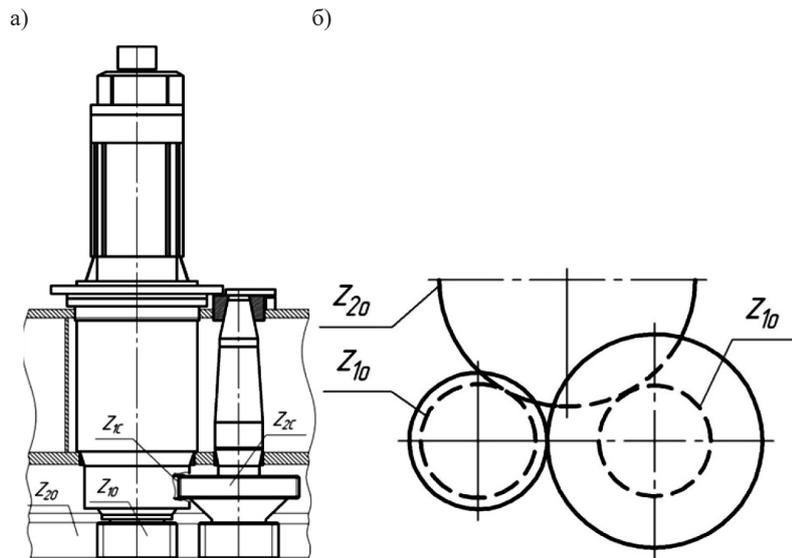


Рис. 2. Распределитель механизма поворота перегрузочного крана «Новороссиец»: а — конструкция привода; б — связь обоих приводных валов с колесом ОПУ

На рис. 3 показан механизм изменения вылета стрелы перегрузочного крана [12]. Конструкция привода 1 исключает жесткое закрепление рейки 2 в кремальере 4, делая ее неуязвимой от перемещений и деформаций стрелы 3 крана. Симметричное приложение равных нагрузок относительно главной вертикальной плоскости инерции рейки на любом вылете стрелы уменьшает изгиб сопряженных узлов и снижает боковое раскачивание стрелы с грузом. Реализация этих свойств обеспечивается взаимодействием зубьев рейки с двумя приводными шестернями, оси вращения которых, перпендикулярные продольной оси рейки, расположены в одной плоскости, проходящей через ось O_1 поворота кремальеры 4.

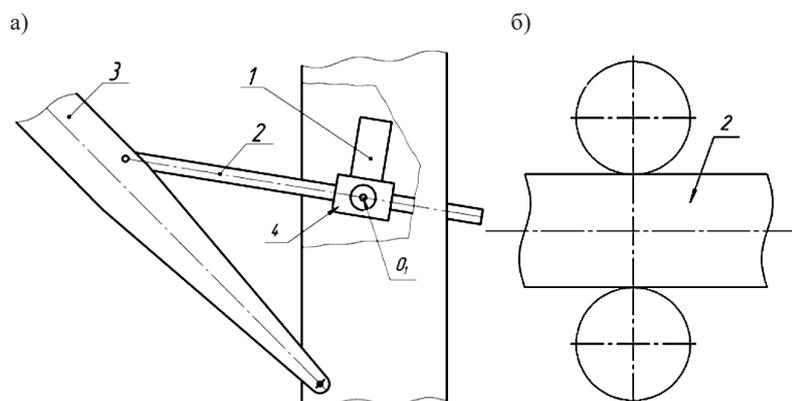


Рис. 3. Механизм изменения вылета стрелы перегрузочного крана «Новороссиец»: а — компоновочная схема; б — вид сверху на зацепление рейки 2 с шестернями приводных валов распределителя

Методология проектирования структур механизмов планетарно-дифференциального типа изложена в публикации [13]. При разработке на базе предложенных структур схемных решений подобных передач нужно учитывать свойства дифференциала, определяемые его энергокинематическим состоянием, без учета которых создание передачи невозможно. В противном случае в распределителе с двумя ведомыми звеньями одно из них может превратиться в ведущее и задача движения и энергии становится невозможной или можно получить генераторный режим, когда один из двигателей не выдает энергию, а получает ее от другого, мощность которого расходуется не только на вращение ведомого звена, но и на вращение двигателя с измененным режимом работы.

В отличие от планетарной передачи, где одно звено неподвижно, в дифференциале $2k-h$ типа A все три звена подвижны. Звенья подобного дифференциала дают три разных подключения к одному ведущему и двум ведомым звеньям: abh , bha , hab (на первом месте — ведущее) и три подключения к одному ведомому и двум ведущим (на первом месте — ведомое).

В целях проектирования отдельного дифференциала следует учитывать его основные свойства.

Свойство 1. Дифференциальный механизм не имеет передаточного отношения, а связь между угловыми скоростями любых трех его звеньев определена уравнением кинематики:

$$\omega_a + p\omega_b - (1+p)\omega_h = 0, \quad (1)$$

разделив которое на $\omega_a \neq 0$, получим

$$1 + p\bar{\omega}_b - (1+p)\bar{\omega}_h = 0,$$

где $\bar{\omega}_b = \omega_b/\omega_a$, $\bar{\omega}_h = \omega_h/\omega_a$ — относительные угловые скорости эпицикла b и водила h .

Передаточное отношение дифференциала возможно только при наличии жесткой связи между угловыми скоростями одноименных звеньев: *двух ведущих* (суммирующий механизм) или *двух ведомых* (распределительный механизм) звеньев в виде двух разных значений: от ведущего звена к одному и другому ведомому или, наоборот, от каждого из двух ведущих к ведомому. Так, в случае, если необходимо обеспечить вращение одноименных звеньев (например, b и h с равными скоростями в противоположных направлениях: $\omega_b = -\omega_h$), из уравнений кинематики найдем:

– для распределительного механизма (b и h — ведомые звенья, подключение abh):

$$i_R = \pm (1 + 2p), \quad (2)$$

где $i_R = i_{ah}^b$ — положительное передаточное отношение от ведущего звена a к ведомому h ;

$i_R = i_{ab}^h$ — отрицательное передаточное отношение от ведущего звена a к ведомому b ;

– для суммирующего механизма (b и h — ведущие звенья, подключение abh):

$$i_\Sigma = \pm 1 / (1 + 2p), \quad (3)$$

где $i_\Sigma = i_{ha}^b$ — положительное передаточное отношение от ведущего звена h к ведомому a ;

$i_\Sigma = i_{ba}^h$ — отрицательное передаточное отношение от ведущего звена b к ведомому a .

Свойство 2. Дифференциал не создает на валах равных крутящих моментов, распределяя их по валам в соответствии со своим внутренним передаточным отношением:

$$T_a : T_b : T_h = 1 : p : -(1+p). \quad (4)$$

Соотношение между моментами планетарной или дифференциальной передачи будет такое же, как и в рядовой передаче, например, соотношение между моментами на эпицикле и солнечном колесе $T_b = -i_{ab}^h T_a = p T_a$. С учетом этого, а также уравнения равновесия моментов на основных звеньях дифференциала:

$$\sum T_i = T_a + T_b + T_h = 0, \quad (5)$$

следует свойство (2). Уравнение равновесия (5) формирует также одно из свойств безопорного дифференциала: сумма моментов на двух ведомых или двух ведущих звеньях (например, звеньях b и h) численно равна моменту на ведущем или ведомом звене a , т. е. $T_b + T_h = |T_a|$.

Свойство 3. На однорядном механизме $2k-h$ нельзя создать дифференциал, в котором одноименные (два ведущих или два ведомых) звенья вращаются в одну сторону ($\omega_h/\omega_b > 0$). Так, рассматривая подключение abh , где одноименные валы подключены к водилу и эпициклу дифференциала (рис. 4), отношение мощностей примет вид

$$\frac{P_h}{P_b} = \frac{T_h \omega_h}{T_b \omega_b} = -i_{bh}^a \frac{\omega_h}{\omega_b} > 0. \quad (6)$$

В случае, если одноименные (два ведущих или два ведомых) звена вращаются в одну сторону, то для соблюдения неравенства (6) при $\omega_h/\omega_b > 0$ подобный дифференциал должен иметь отрицательное передаточное отношение $i_{bh}^a < 0$, что невозможно, так как при указанных подключениях передаточное отношение $i_{bh}^a = (p+1)/p > 0$ положительно.

Таким образом, создание дифференциальной передачи возможно только в том случае, когда эти звенья вращаются в разные стороны, т. е. когда $\omega_h/\omega_b < 0$. При этом передаточное отношение i_{bh}^a должно быть положительным, т. е. $i_{bh}^a > 0$, что и характерно для однорядного механизма $2k-h$ типа A .

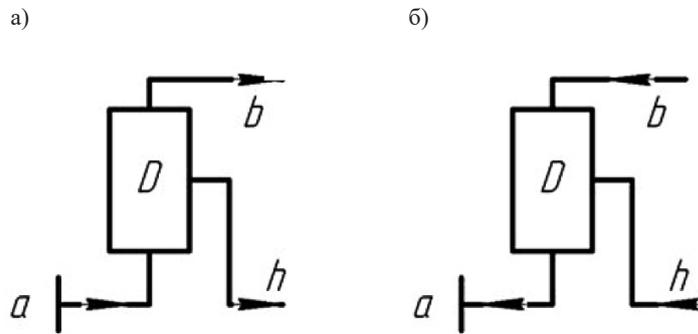


Рис. 4. Одноименные звенья дифференциала D (водило h и эпицикл b в распределительной схеме): a — ведомые в суммирующей схеме; b — ведущие

Подобный вывод можно сделать при рассмотрении двух других случаев подсоединения валов распределителя к звеньям дифференциала D . Для подключения bha отношение мощностей одноименных звеньев водила к солнцу, можно выразить неравенством

$$\frac{P_h}{P_a} = \frac{T_h \omega_h}{T_a \omega_a} = -i_{ah}^b \frac{\omega_h}{\omega_a} > 0 \quad (7)$$

и поскольку передаточное отношение $i_{ah}^b > 0$, то при $\omega_h/\omega_a > 0$, неравенство (7) не соблюдается; для подключения hab отношение мощностей одноименных звеньев: эпицикла и солнца, будет

$$\frac{P_b}{P_a} = \frac{T_b \omega_b}{T_a \omega_a} = i_{ab}^h \frac{\omega_b}{\omega_a} > 0, \quad (8)$$

где передаточное отношение $i_{ab}^h < 0$, что не позволяет выполнить условие (8).

Свойство 4. Распределить, в дифференциале $2k-h$ типа A , мощность равными потоками можно только при разных скоростях вращения одноименных (двух выходных или двух входных) звеньев. Так, при подключении abh на одноименных звеньях h и b равные потоки мощности:

$$\frac{P_h}{P_b} = \frac{T_h \omega_h}{T_b \omega_b} = \frac{T_a (p+1) \omega_h}{T_a p \omega_b} = 1, \quad (9)$$

можно получить лишь при соблюдении фиксированного отношения скоростей: $\omega_h/\omega_b = p/(p+1)$.

Из равенства (9) также очевидна невозможность получения равных потоков мощности при равных значениях и разной по знаку скорости вращения (в данном подключении при $\omega_h = -\omega_b$), так как необходимо выполнение равенства $|p/p+1| = 1$, которое получить нельзя. Распределить

мощности равными потоками при равных по значению и разных по знаку скоростях вращения можно, если установить в приводе симметричный конический дифференциал, у которого $i_{ab}^h = -1$ и при $\omega_b/\omega_a = -1$, а также при подключении *hab* соблюдается равенство (8).

Рассматриваемые в работе конструкции распределителя строятся на однорядном планетарном механизме с включением в одну из его одноименных ветвей дополнительной зубчатой передачи (рис. 5, а). Подобное решение создает симметричный дифференциал, обеспечивая равенство моментов на выходных валах в условиях их независимого вращения. В случае необходимости не исключается возможность создать симметричный дифференциал установкой в его конструкции двух и более планетарных однорядных механизмов. Обобщенная схема распределителя представлена на рис. 5, б.

При проектировании распределителя соблюдают следующие условия:

- создание между моментами заданного соотношения *R*:

$$T_2 = RT_1; \quad (10)$$

$$T_1 = i_{p1} T_A, \quad (11)$$

где $i_{p1} = \frac{T_1}{T_A} = \frac{\omega_A}{\omega_1} \Big|_{\omega_2=0}$ — передаточное отношение дифференциальной ветви (без учета трения),

которое в общем случае может быть как положительным, так и отрицательным;

- обеспечение заданного соотношения между скоростями вращения валов:

$$S = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (12)$$

где T_a, T_1, T_2 — вращающие моменты, действующие извне на ведущее звено *A* дифференциала и на ведомые валы 1 и 2 распределителя момента (рис. 5, б);

R и *S* — параметры распределения, соответственно, моментов и скоростей между валами распределителя (устанавливаются условиями работы машины и являются наперед заданными числами).

В судовых передачах мощность равенство (12) обычно достигается выбором характеристик гребных валов, а из-за различия в условиях обтекания гребных винтов с противоположным вращением выдерживают $R = -(1-1,3)$ [14].

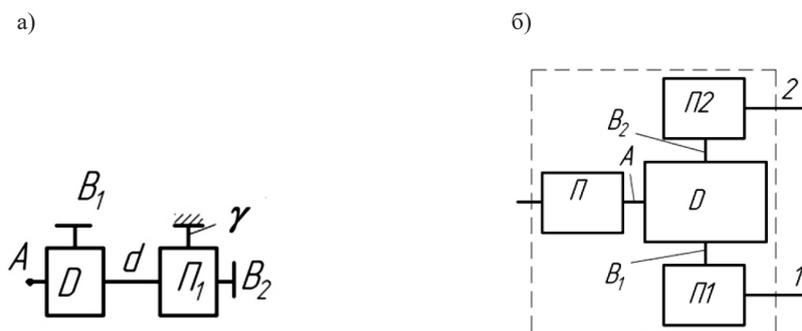


Рис. 5. Симметричный дифференциал (а), обобщенная схема распределителя момента (б):

A, B₁, B₂ — соответственно ведущее звено и одноименные звенья дифференциала;

γ — опорное звено; 1, 2 — ведомые валы распределителя

С учетом формул (10) и (11) выразим уравнение мощностей распределителя $T_A\omega_A + T_1\omega_1 + T_2\omega_2 = 0$ в виде равенства $T_A(\omega_A + i_{p1}\omega_1 + RSi_{p1}\omega_1) = 0$, откуда при $T_A \neq 0$ получим формулу

$$n_A = -i_{p1}(n_1 + RSn_1), \quad (13)$$

в которой выполнена замена обозначения угловой скорости ω на обозначение частоты вращения *n*. В распределительном механизме произведение $RS = (P_2/P_1) > 0$ представляет отношение мощностей

на одноименных (ведомых) валах, поэтому оно положительно (см. также свойство 3). В противном случае один из ведомых валов будет ведущим, что сделает распределение движения невозможным.

Из уравнения (13), вынеся за скобки параметр n_1 и отмечая в верхнем индексе передаточного отношения i_{A1} условия, при которых обычно происходит работа распределителя, находим связь между параметрами распределения:

$$\frac{n_A}{n_1} = i_{A1}^{(S n_1 = n_2)} = -i_{p1} (1 + RS). \quad (14)$$

Передаточное отношение распределителя $i_{A1}^{(S n_1 = n_2)} = n_A / n_1$ может быть задано непосредственно или его можно вычислить через отношение скоростей вращения валов, определяемых условиями работы машины. Из равенства (14) передаточные отношения дифференциальных ветвей распределителя определяются по формулам:

$$i_{p1} = -\frac{i_{A1}^{(S n_1 = n_2)}}{1 + RS}; \quad (15)$$

$$i_{p2} = R i_{p1}. \quad (16)$$

Установленные свойства дифференциалов во многом определяют процесс проектирования механизмов приводов, отвечающих заданным энергокинематическим и схемно-компоновочным требованиям.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

Расчет распределителя с постановкой согласующей передачи в одной из ветвей дифференциала при одном ведущем и двух ведомых звеньях (рис. 5, а), создающего на последних равные вращающие моменты и скорости вращения, требует рассмотрения двух возможных случаев:

- 1) вращение выходных валов в одном направлении (попутное вращение):

$$n_{B_1} = n_{B_2}; \quad S = 1, \quad R = 1;$$

- 2) вращение выходных валов в противоположных направлениях (встречное вращение):

$$n_{B_1} = -n_{B_2}; \quad S = -1, \quad R = -1.$$

В обоих случаях параметр распределения мощностей $RS = 1 > 0$, т. е. положителен. Поскольку, согласно данному условию, в рассматриваемых случаях работа распределителя происходит при равном распределении мощностей, при близких значениях частот вращения выходных валов ($n_1 \approx n_2$) и, соответственно, передаточное отношение дифференциальной ветви:

$$i_{p1} = i_{p2} = i_p = 0,5 i_{A1}^{(R=P_2)}, \quad (17)$$

необходимо в два раза меньше общего передаточного отношения распределителя (15) и (16). Другими словами, дифференциал с установленным для него передаточным отношением реализует силовой привод с передаточным отношением, большим в два раза, что, естественно, требует более простой его конструкции и приводит к повышению надежности и удешевлению силового привода машины.

Рассмотрим решение задачи равного распределения мощностей, используя структуру рис. 5, а. Частота вращения звеньев дифференциала, построенного на базе данной структуры, связана уравнением

$$n_A = i_{AB_1}^{B_2} n_{B_1} + (1 - i_{AB_1}^{B_2}) n_{B_2}, \quad (18)$$

в котором одноименные звенья обозначены, соответственно, через B_1 и B_2 . В данной структуре моменты на ведомых валах связаны с моментом на ведущем валу формулами:

$$T_{B_1} = -T_A i_{AB_1}^d; \quad T_{B_2} = -T_A (1 - i_{AB_1}^d) i_{dB_2}^y,$$

посредством которых с учетом равенства (10) формула для расчета передаточного отношения $i_{dB_2}^y$ согласующей передачи Π_1 , расположенной в одной из дифференциальных ветвей, принимает вид

$$i_{dB_2}^y = \frac{Ri_{AB_1}^d}{1 - i_{AB_1}^d}. \quad (19)$$

В свою очередь, частота вращения звеньев дифференциала D связана уравнением

$$n_A = i_{AB_1}^d n_{B_1} + (1 - i_{AB_1}^d) n_d = i_{AB_1}^d n_{B_1} + (1 - i_{AB_1}^d) n_{B_2} i_{dB_2}^y, \quad (20)$$

или подставляя в (20) $n_{B_2} = Sn_{B_1}$, получим уравнение

$$n_A = i_{AB_1}^d n_{B_1} + (1 - i_{AB_1}^d) Sn_{B_1} i_{dB_2}^y = n_{B_1} [i_{AB_1}^d + (1 - i_{AB_1}^d) Si_{dB_2}^y]. \quad (21)$$

Взяв отношение скорости вращения ведущего вала A к скорости вращения первого ведомого вала B_1 : $i_{D1} = n_A/n_{B_1}$, для определения передаточного отношения распределителя на базе рис. 5, а имеем равенства:

$$i_{D1} = i_{AB_1}^d (1 + SR) = i_{AB_1}^d + (1 - i_{AB_1}^d) Si_{dB_2}^y. \quad (22)$$

Для отношения $i_{D2} = n_A/n_{B_2}$ скоростей вращения ведущего вала A ко второму ведомому валу B_2 , будут иметь место равенства:

$$i_{D2} = i_{AB_1}^d (1 + SR) \frac{1}{S} = i_{AB_1}^d \frac{1}{S} + (1 - i_{AB_1}^d) i_{dB_2}^y. \quad (23)$$

Полученные равенства позволяют оценить кинематические возможности распределителя, построенного на одном однорядном механизме по рис. 5, а без дополнительных передач Π , Π_2 (рис. 5, б). Рассмотрим три возможных случая подсоединения двух одноименных (ведомых) валов распределителя к звеньям дифференциала D .

Первый случай — вал B_1 подключен к водилу дифференциала h , вал B_2 подключен к эпициклу дифференциала b через звено d согласующей передачи Π_1 . В этом случае $i_{AB_1}^d = i_{ah}^b = p + 1$ и на основании формулы (22) имеем

$$i_{D1} = i_{AB_1}^d (1 + SR) = 2i_{ah}^b = 2(p + 1). \quad (24)$$

Если применять однорядный механизм, ограничивая допустимое значение его конструктивного параметра установленными практикой рациональными значениями $p = 1,4-7$, то на основании (24) передаточное отношение распределителя не может быть больше 16. Соответствующее передаточное отношение согласующей передачи Π_1 можно представить в виде формулы

$$i_{dB_2}^y = -R(p + 1) / p, \quad (25)$$

а его знак определит параметр R : при $R = -1$ из уравнения (25) следует, что передача с внешними зубьями должна строиться на четном числе зацеплений (например, по трехколесной или двухступенчатой схеме), а при $R = 1$ — на нечетном числе зацеплений (например, по одноступенчатой схеме).

Второй случай — вал B_1 по-прежнему подключен к водилу h , вал B_2 через согласующую передачу Π_1 подключен к солнечному колесу a . В данном случае имеем распределитель

$$i_{D1} = i_{bh}^a (1 + SR) = 2 \frac{p+1}{p},$$

который при $p = 1,4-7$ реализует передаточное отношение в пределах $i_{D1} = 3,43-2,28$.

Третий случай — вал B_1 подключен к эпициклу b , вал B_2 через согласующую передачу Π_1 подключен к солнечному колесу a . В этом случае имеем

$$i_{D1} = i_{hb}^a (1 + SR) = 2 \frac{p}{p+1}.$$

Распределитель с передаточным отношением в пределах $i_{D1} = 1,166-1,754$.

Таким образом, практический интерес с точки зрения получения большого передаточного отношения представляет распределитель с подключением его ведомых валов, соответственно, к водилу и к эпициклу дифференциала (см. первый случай). Для создания распределителя момента с общим передаточным отношением, превышающим указанное в первом случае, рекомендуется перед дифференциалом установить дополнительную передачу П (рис. 5, б), что проще, чем создавать распределитель на основе дифференциала, составленного из нескольких однорядных механизмов.

При установке перед дифференциалом дополнительной передачи П общее передаточное отношение i_o распределителя можно выразить в виде формулы

$$i_o = i_{\Pi} i_D u, \quad (26)$$

где i_{Π} — передаточное отношение передачи П, установленной перед дифференциалом;

u — передаточное число открытой передачи (при наличии таковой в приводе).

Применим полученную методику к построению распределителя для механизма изменения вылета стрелы перегрузочного порталного крана. Кинематическая схема распределителя силового привода 1 (см. рис. 3) механизма изменения вылета приведена на рис. 6. Расположение приводных валов в кремальере несоосное. На валах необходимо обеспечить равные вращающие моменты при противоположном вращении приводных шестерен, т. е. при $n_{B1} = -n_{B2}$, обеспечиваемом их зацеплением с общей зубчатой рейкой. В этом случае отношение скоростей $S = -1$ и моментов $R = -1$.

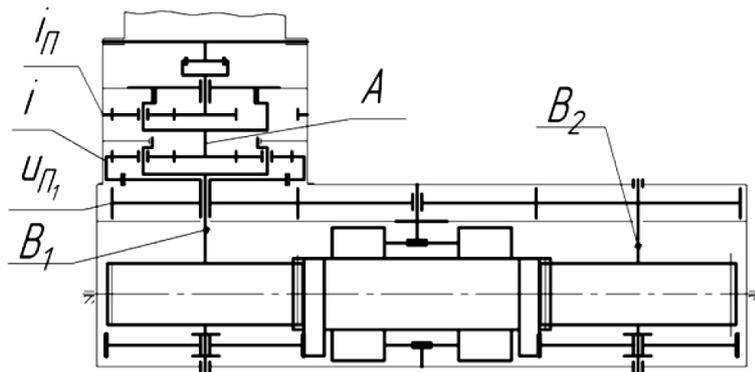


Рис. 6. Кинематическая схема распределителя момента механизма изменения вылета стрелового перегрузочного крана «Новороссиец»

При частоте вращения двигателя 955 об/мин частота вращения выходных валов 10,2 об/мин. При $n_A = 955$ об/мин, $n_1 = 10,2$ об/мин требуемое общее передаточное отношение $i_o = i_{\Pi} i_D = 955 / 10,2 = 93,627$, равно произведению передаточного отношения дополнительной передачи, установленной перед симметричным дифференциалом на передаточное отношение, реализуемое дифференциалом. Поскольку $i_{\Pi} \cdot i_D > 2|i_p| > 16$ перед дифференциалом устанавливаем дополнительную передачу П. Для получения малого диаметрального габарита распределителя момента назначаем конструктивный параметр $p = 3,5$. Тогда передаточное отношение, реализуемое дифференциалом на основании формулы (24), будет равно $i_{D1} = 2(p + 1) = 2(3,5 + 1) = 9$, а передаточное отношение передачи П₁ при $R = -1$ определится из равенства (25) следующим значением:

$$i_{AB_2} = \frac{1+p}{p} = \frac{1+3,5}{3,5} = 1,286.$$

В результате передаточное отношение дополнительной передачи перед дифференциалом составит $i_{\Pi} = i_{\Pi} i_D / i_D = \frac{93,627}{9} = 10,4$, и может быть реализовано в одном однорядном планетарном механизме при конструктивном параметре $p = i_{\Pi} - 1 = 10,4 - 1 = 9,4$. В силу его малой нагруженности диаметральный габарит при $p = 9,4$ не будет превышать аналогичный размер дифференциала.

В конструкции для получения равных скоростей вращения обеих приводных шестерен синхронизирующая передача не требуется. Ее роль играет внешняя связь в виде зубчатой рейки, с которой зацепляются обе приводные шестерни.

Такие вопросы повышения надежности, как учет прочности узлов [15], влияние подбора чисел зубьев дифференциала [16] и распределение передаточного отношения [17], не имеют существенных отличий от вопросов, имеющих место при разработке редукторов.

Заключение (Conclusions)

В статье исследованы вопросы теории передач дифференциальных устройств. Сформулированы свойства дифференциальных механизмов, обусловленные их энергокинематическим состоянием, и на их основе получены аналитические зависимости. Установленные свойства дифференциалов во многом обуславливают способ проектирования сложных механизмов для приводов, отвечающих заданным энергокинематическим и схемно-компоновочным требованиям.

Предложенные решения позволяют определить параметры новых, направленных на повышение надежности силовых приводов, получаемых заменой традиционных конструкций судовых и крановых механизмов устройствами планетарно-дифференциального типа. С учетом требований о необходимости создания приводов с большим передаточным отношением, показано, что практический интерес в данном случае представляет распределитель с подключением его ведомых валов, соответственно, к водилу и к эпициклу дифференциала. Такие вопросы повышения надежности, как учет прочности узлов, влияние подбора чисел зубьев дифференциала и распределение передаточного отношения, а также расчет геометрических размеров зубчатых передач, не имеют существенных отличий от вопросов, используемых при разработке редукторов и поэтому в данном исследовании не рассматриваются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The Motor ship, march, 1989. Заявка Японии № 59–8595 кл. В63 Н 23/28, опубл.1984.
2. Щемелев В. Л. Автоматизация работы спредера при обработке крупнотоннажных контейнеров в условиях крена и дифферента судна / В. Л. Щемелев, И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов. // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2023. — № 2. — С. 101–107. DOI: 10.24143/2073-1574-2023-2-101-107. — EDN AYVDGS.
3. Волков Д. П. Трансмиссии строительных и дорожных машин: справ. пособие / Д. П. Волков, А. Ф. Крайнев. — М.: Машиностроение, 1974. — 424 с.
4. Ткаченко В. А. Вопросы синтеза простых дифференциальных зубчатых редукторов для привода воздушных и гребных винтов / В. А. Ткаченко, И.Г Шебанов // Вестник НТУ – «ХПИ». — 2002. — № 10. — С. 46–53.
5. Конищева О. В. Исследования дифференциального зубчатого вариатора / О. В. Конищева, Е. В. Брюховецкая, М. В. Брунгардт, А. Н. Щепин // Фундаментальные основы механики. — 2019. — № 4. — С. 104–108. DOI: 10.26160/2542-0127-2019-4-104-108. — EDN IINMTC.
6. Акрамов Б. Н. О кинематических возможностях замкнутых зубчатых дифференциальных механизмов с цилиндрическими колесами / Б. Н. Акрамов, И. А. Исмаилов // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. — 2023. — № 3(142). — С. 82–89. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_3_82. — EDN AMJTIO.
7. Синенко Е. Г. Методика проектирования эксцентричных планетарных передач / Е. Г. Синенко, О. В. Конищева // Машиностроение: сб. науч. ст. — Красноярск, 2009. — С. 63–68.
8. Синенко Е. Г. Кинематика и механика зубчатого дифференциала / Е. Г. Синенко, Д. Д. Абазин, О. В. Конищева // Технология машиностроения. 2008. № 9. С. 64–66.
9. Бирюков И. В. Тяговые передачи электроподвижного состава железных дорог / И. В. Бирюков, А. И. Беляев, Е. К. Рыбников. — М.: Транспорт, 1986. — 256 с.
10. Яровая Д. Д. Расчет планетарных редукторов механизма передвижения тележки подъемного крана. /Д. Д. Яровая, А. М. Петров. // Актуальные проблемы науки и техники. 2022: Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 16–18 марта 2022 года / Отв. ред. Н. А. Шевченко. — Ростов н/Д: Донской гос. техн. ун-т, 2022. — С. 379–381. — EDN UPWVYM.

11. А. с. SU 1 449 524 A1 СССР, МПК. В 66 С 9/14. Механизм передвижения крана / А. Н. Иванов, В. А. Васильев, С. Н. Федотов и др. — заявл. 22.01.1987; опубл. 07. 01 89. Бюл. № 1. — 3 с.
12. Пат. SU 1 723 012 A1 СССР, МПК В 66 С 23/82 Механизм изменения вылета стрелы крана / А. Н. Иванов, В. А. Васильев, А. А. Ковин, Б. И. Плавник; заяв. и патентообл. Ленинградское производственное объединение подъемно-транспортного оборудования им. С. М. Кирова. — заявл. 05.12.1988; опубл. 30.03.92, Бюл. № 12. — 8 с.
13. Барышников С. О. Обзор методов представления структуры зубчатых механизмов / С. О. Барышников, А. Н. Иванов // *Морской вестник*. — 2011. — № 2(38). — С. 108–110. — EDN OCRJBV.
14. Пыж О. А. Редукторы судовых турбоагрегатов / О. А. Пыж, Л. М. Гаркави, Ю. А. Державец, Р. Р. Гальпер. — Л.: Судостроение, 1975. — 272 с.
15. Матвеева Е. В. Особенности расчета прочности узлов редукторов порталных и судовых кранов в вероятностном аспекте / Е. В. Матвеева, А. К. Афанасьев, А. Н. Иванов // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. — 2024. — Т. 16, № 1. — С. 121–133. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-121-133. — EDN QORCIU.
16. Барышников С. О. Анализ условий подбора чисел зубьев планетарных редукторов / С. О. Барышников, А. Н. Иванов // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 52–63. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-52-63. — EDN ККХКТФ.
17. Барышников С. О. Особенности распределения передаточного отношения рядовых редукторов с высокой твердостью зубьев для привода судовых и крановых механизмов / С. О. Барышников, А. К. Афанасьев, А. Н. Иванов // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. — 2021. — Т. 13, № 5. — С. 694–709. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-694-709. — EDN ZKERQI.

REFERENCES

1. The Motor ship, march, 1989. Japanese application No. 59–8595 cl. B63 N 23/28, publ. 1984.
2. Shchemelev, V. L. Zubov, I. V. and Yezhov, Yu. E. “Automation of the spreader operation during processing of large-capacity containers in conditions of roll and trim of the vessel” *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and Technology* 2 (2023): 101–107.
3. D. P. Volkov, A. F. Krainev. *Transmissions of construction and road vehicles: reference. Manual*. — М.: Mashinostroenie, 1974.
4. V. A. Tkachenko, I. G. Shebanov. “Issues of synthesis of simple differential gear reducers for the drive of air and propellers”. *Bulletin of NTU — “KHPI”* 10 (2002): 46–53.
5. O. V. Konishcheva, E. V. Bryukhovetskaya, M. V. Brungardt, A. N. Shchepin. “Studies of differential gear variator.” *Fundamental Principles of Mechanics* 4 (2019): 104–108. DOI: 10.26160/2542-0127-2019-4-104-108.
6. B. N. Akramov, I. A. Ismatov. “On the kinematic possibilities of closed gear differential mechanisms with cylindrical wheels.” *Proceedings of the NSTU named after R. E. Alekseev* 3(142) (2023): 83–87.
7. E. G. Sinenko, O. V. Konishcheva. “Methods of designing eccentric planetary gears.” *Mechanical engineering: sb. nauch. tr.* Krasnoyarsk, 2009: 63–68.
8. E. G. Sinenko, D. D. Abazin, O. V. Konishcheva. “Kinematics and mechanics of a gear differential.” *Mechanical engineering technology* 9 (2008): 64–66.
9. Biryukov I. V., Belyaev A. I., Rybnikov E. K. *Traction gears of electric rolling stock of railways*. — М.: Transport, 1986.
10. D. D. Yarovaya, A. M. Petrov. “Calculation of planetary gearboxes of the crane trolley movement mechanism. Actual problems of science and technology.” *Rostov-on-Don, March 16–18, 2022 Materials of the All-Russian (national) scientific and practical conference*. (2022): 379–381.
11. A. N. Ivanov, V. A. Vasiliev, S. N. Fedotov, et al.. SU 1 449 524 A1, IPC B 66 C 9/14, 1988. The mechanism of movement of the crane / application. Russian Federation, assignee. Publ. 07 January 1989.
12. A. N. Ivanov, V. A. Vasiliev, A. A. Kovin, B. I. Plavnik. SU 1 723 012 A1, IPC B 66 C 23/82 A mechanism for changing the boom of a crane. Russian Federation. Publ. 30 March 1992.
13. S. O. Baryshnikov, A. N. Ivanov. “Review of methods for representing the structure of gear mechanisms” *Marine Bulletin* 2(38) (2011): 108–110.
14. O. A. Pyzh, L. M. Garkavi, Yu. A. Derzhavets, R. R. Galper. *Reducers of marine turbine units*. Leningrad: Shipbuilding, 1975.

15. Matveeva, E. V., Afanasyev, A. K., Ivanov, A. N. “Features of calculating the strength of gear units of gantry and ship cranes in a probabilistic aspect.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 121–133.

16. Baryshnikov S. O., Ivanov A. N. “Analysis of conditions for selecting the number of teeth of planetary gearboxes.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.1 (2023): 52–63.

17. Baryshnikov, S. O., Afanasyev, A. K., Ivanov, A. N. “Features of the distribution of the gear ratio of ordinary gearboxes with high tooth hardness for driving ship and crane mechanisms.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.5 (2021): 694–709.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Иванов Анатолий Николаевич

кандидат технических наук, доцент
ФБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская 5/7
e-mail: ivanovgumrf@yandex.ru

Матвеева Елена Владимировна —

кандидат технических наук, доцент
ФБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: matveevaev@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivanov, Anatoly N. —

PhD, associate professor
Admiral Makarov State University
Of Marine and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: ivanovgumrf@yandex.ru

Matveeva, Elena V. —

PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: matveevaev@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 19 сентября 2024 г.
Received: September 19, 2024.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-775-783

A MULTI-LEVEL SYSTEM FOR ENSURING THE RELIABILITY OF MARINE MECHANICAL SYSTEMS AT THE STAGES OF THE LIFE CYCLE

E. S. Moseyko¹, E. O. Ol'khovik², V. U. Rud²

¹ — “Iceberg” Central Design Bureau, St. Petersburg, Russian Federation

² — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

The operation of vessels in the waters of the Northern Sea Route imposes additional requirements on ship mechanical equipment in accordance with Chapter 6 of the Polar Code. The most urgent scientific tasks include the following: designing new ice-class vessels for operation in the Arctic and extending the service life of the existing Arctic fleet, which should ensure operability at low air temperatures. Forecasting the service life of marine mechanical systems, taking into account the effects of external cyclic loads and the marine corrosive environment, is a complex complex task, for which it is necessary to consider all stages of the life cycle from design to the moment of termination of their operation. In order to improve the existing methods of reliability assessment, accidents on ships operating in Polar waters were considered. A resource management program is proposed that allows you to systematize organizational and technical measures not only during operation, but also allows you to make forecasts at the design stage. A risk management program is proposed that allows you to link organizational and technical measures aimed at identifying the elements of marine mechanical systems that most need attention, thereby effectively distributing maintenance. At the stages of the life cycle, a multi-level reliability assurance system is proposed, including three levels of assessment: reliability management; resource management and risk management.

Keywords: accidents, risk assessment, failure warning, ensuring reliability, system life cycle.

For citation:

Moseyko, Evgeniy S., Ol'khovik, Evgeniy O., Rud Vasily Y. “A multi-level system for ensuring the reliability of marine mechanical systems at the stages of the life cycle.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.6 (2024): 775–783. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-775-78.

УДК 621.78/79:629

МНОГОУРОВНЕВАЯ СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СУДОВЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Е. С. Мосейко¹, Е. О. Ольховик², В. Ю. Рудь²

¹ — АО «Центральное конструкторское бюро «Айсберг», Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Темой исследования является развитие методов обеспечения надежности судовых механических систем. Эксплуатация судов в акватории Северного морского пути накладывает дополнительные требования, предъявляемые к судовому механическому оборудованию согласно гл. 6 Полярного кодекса. Актуальность исследования обусловлена тенденцией к проектированию новых судов ледового класса для работы в Арктике и продлению срока службы существующего арктического флота, который должен обеспечивать работоспособность при низких температурах воздуха. Особое внимание уделено рассмотрению прогнозирования срока службы судовых механических систем. Отмечается, что с учетом воздействия внешних циклических нагрузок и морской коррозионной среды оценка надежности является сложной комплексной задачей, для решения которой необходимо рассматривать все этапы жизненного цикла от проектирования до момента прекращения их эксплуатации. В целях улучшения существующих методов оценки надежности в процессе работы были рассмотрены аварийные случаи на судах, работающих в полярных водах. Предложена программа управления ресурсами, позволяющая систематизировать организационно-технические мероприятия в период эксплуатации, а также осуществлять прогнозирование на этапе проектирования.

Предложена программа управления рисками, позволяющая объединить организационно-технические мероприятия, направленные на определение элементов судовых механических систем, требующих особого внимания, эффективно распределяя при этом техническое обслуживание. На этапах жизненного цикла предлагается система обеспечения надежности, включающая три уровня оценки: управление надежностью, управление ресурсом и управление рисками.

Ключевые слова: аварийные случаи, оценка рисков, предупреждение отказов, обеспечение надежности, жизненный цикл системы.

Для цитирования:

Мосейко Е. С. Многоуровневая система обеспечения надежности судовых механических систем на этапах жизненного цикла / Е. С. Мосейко, Е. О. Ольховик, В. Ю. Рудь // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 5. — С. 775–783. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-775-783.

Введение (Introduction)

В течение последних 10 лет утверждены несколько государственных программ в области развития Северного морского пути и судостроительной промышленности на период до 2035 г., в которых строительство новых и модернизация действующих судов для Арктики является важной государственной задачей [1], [2]. Для реализации этой задачи конструкторские бюро и судостроительные заводы выполняют проектирование и строят новые транспортные суда, ледоколы, суда технического обслуживания и др.

В настоящее время осуществляется постепенный переход к применению отечественного механического оборудования, что также связано с задачами импортозамещения. На этапе выпуска конструкторской документации судовых механических систем (СМС) закладывается их надежность на основе данных технических условий на входящие элементы. Однако в условиях воздействия коррозионной среды и циклических нагрузок прогнозирование ресурса и срока службы новой техники является комплексной задачей [3].

Опыт эксплуатации показывает, что предупреждение отказов с использованием таких мер, как техническое обслуживание и ремонт, могут иметь следующие недостатки: разная интенсивность старения элементов СМС; несвоевременность поставки запасных частей; отсутствие постоянных поставщиков оборудования; завышение видов судоремонтных работ; смещение плановых сроков и др.

Одним из основных способов повышения эффективности эксплуатации судов и улучшения надежности СМС является совершенствование их методов оценки и прогнозирования. Надежность является следствием многих других свойств, таких как прочность материалов, технология изготовления, а также правильная техническая эксплуатации. Формирование этих показателей требует организованной системы обеспечения надежности на всех этапах жизненного цикла [4].

Следует также отметить результаты проведенных исследований надежности СМС на основе данных об их фактическом наблюдении в период эксплуатации, выполненных в работе [5]. Для этого были выбраны элементы оборудования общесудовых систем и систем ВЭУ за последние 10 лет после 30 лет их эксплуатации. Было выявлено, что часть насосов в составе СМС была заменена до выработки назначенного ресурса, при этом работоспособность систем в целом сохранялась; для части насосов их заданный ресурс был превышен, но при очередном техническом освидетельствовании период их эксплуатации был продлен.

Целью данной работы является систематизация показателей для обеспечения надежности на этапах жизненного цикла СМС.

В результате исследования предложен вариант построения связей между показателями надежности разных уровней.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В объеме статистических данных выполнен подробный анализ аварийных случаев (АС), полученных из открытых источников информации: Федеральной службы по надзору в сфере транспорта (Ространснадзор), ФГБУ «Администрация Северного морского пути», Международной

морской организации (англ. IMO), Европейского агентства по безопасности на море (англ. EMSA), Allianz Global Corporate & Special (страховое общество), Регистра Ллойд. Определены особенности, необходимые для оценки технических рисков находящихся в эксплуатации судов, работающих в полярных водах. Отдельной задачей является постоянное дополнение статистических данных о неисправностях и предотказных состояниях СМС [3].

По результатам исследования предлагается классификация АС применительно к СМС, позволяющая объединить их в связанную систему: «элемент — СМС — судно» (рис. 1) с использованием следующих условных обозначений:

- зелеными линиями показаны инциденты, произошедшие с отдельными элементами СМС, которые не приводят к полному нарушению работоспособности СМС;
- оранжевыми линиями показаны серьезные инциденты, произошедшие с отдельной СМС, которые приводят к выходу ее из строя, при этом судно сохраняет свои эксплуатационные характеристики;
- красными линиями показана авария, произошедшая по причине нарушения работоспособности одной или нескольких СМС, которые приводят к ограничению или потере эксплуатационных характеристик судна.

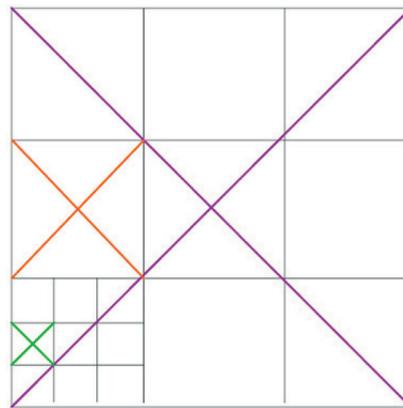


Рис. 1. Связанная система СМС судна с обозначением возможных вариантов развития АС по категориям (классификация):
 — аварии; — серьезные инциденты; — инциденты, аварии

В настоящее время АС происходят стохастически и анализ их выполняется в количественных показателях. Предлагается структурировать отказы на *построечные, эксплуатационные и связанные с деградацией*. На рис. 2 приведен график развития количества инцидентов.

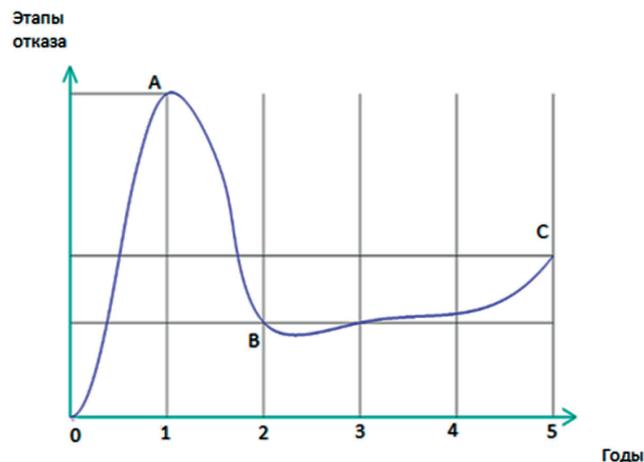


Рис. 2. График развития инцидентов, связанных с работой судовых механических систем:
 А — построечные отказы; В — эксплуатационные отказы;
 С — отказы, связанные с необратимой деградацией элементов СМС

Дополнительно следует отметить, что ряд АС является причиной реализации навигационных рисков, вызванных в большинстве случаев неправильными действиями судоводителя, что не связано с нарушением работы СМС.

Результаты (Results)

Предлагается проведение организационно-технических мероприятий в виде «Программы управления ресурсом судовых технических систем», общее содержание которой отражено в табл. 1. В настоящее время организационно-технические мероприятия проводятся, при этом на гражданских судах, работающих в полярных водах, они не систематизированы. В частности, замена элементов происходит в случае отказа либо после установленного срока службы. Необходимо проводить оценку функциональной надежности элементов по фактическому техническому состоянию, наработке, а также с использованием моделей прогнозирования.

Таблица 1

Основные организационно-технические мероприятия программы управления ресурсом судовых механических систем

Перечень мероприятий по управлению ресурсом	Нормативные и организационно-методические документы	Отчетные документы по управлению ресурсом
1. Проведение технического обслуживания и плановых ремонтов	ГОСТ 19439.1–74 ¹ ГОСТ 27.606–2013 ²	Техническое описание и инструкции по эксплуатации
2. Информационно-техническое обеспечение	Требует разработки в виде национального стандарта	Комплекс мониторинга: – перечень контролируемых параметров; – диагностика фактического состояния;
3. Классификационное освидетельствование	Правила РС ³	Освидетельствование надводной и подводной части судна
4. Оценка технического состояния	Правила РС ³	Заключение технического состояния судна
5. Продление срока службы	Правила РС ³	Обоснование возможности продления срока службы
6. Определение остаточного ресурса	Технические условия, технический паспорт	Анализ выработанного ресурса, событийная модель эксплуатации
7. Определение запасных частей	ГОСТ 27.507–2015 ⁴	Ведомость комплекта ЗИП по механической части

По результатам оценки и анализа риска предлагается «Программа управления рисками», общий вид которой дан в табл. 2. В свою очередь, технические решения позволяют систематизировать и установить взаимосвязь организационно-технических мероприятий, направленных на определение элементов СМС, требующих особого внимания, в целях эффективного распределения ТО.

¹ ГОСТ 19439.1–74. Типовая номенклатура документов для морских судов и судов внутреннего плавания; введ. 1976-01-01 / Государственный комитет СССР по стандартам. М.: Изд-во стандартов, 1976. 14 с.

² ГОСТ 27.606–2013. Надежность в технике. Управление надежностью. Техническое обслуживание, ориентированное на безотказность; введ. 2014-06-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. М.: Изд-во стандартов, 2013. 51 с.

³ Российский морской регистр судоходства. Правила классификационных освидетельствований судов в эксплуатации НД №2-020101-012. Изд. 2020.

⁴ ГОСТ 27.507–2015. Надежность в технике. Запасные части, инструменты и принадлежности. Оценка и расчет запасов; введ. 2017-03-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. М.: Изд-во стандартов, 2017. 69 с.

Таблица 2

Основные организационно-технические мероприятия программы управления рисками

Перечень мероприятий по управлению рисками	Нормативные организационно-методические документы	Отчетные документы по управлению рисками
1. Выбор предмета для анализа и определение оценки	Программа обследования технического состояния	Пояснительная записка оценки технического состояния
2. Определение опасностей	Акты и протоколы осмотра технического состояния	Заключение технического состояния
3. Оценка вероятности и последствий	ГОСТ Р 27.303–2021 ⁵	Техническое описание вероятностей и последствий
4. Приемлемость риска	ГОСТ Р 27.303–2021	Техническое описание вероятностей и последствий
5. Варианты управления риском	ГОСТ Р 27.303–2021	Автоматическое управление техническими средствами
6. Оценка рисков	ГОСТ 27.310–95 ⁶	Матрица рисков неисправностей
7. Определение критичности отказов	ГОСТ 27.310–95	Методика анализа видов, последствий и критичности отказов (АВПКО)
8. Проведение контроля строящихся и модернизируемых судов	Требует разработки в виде национального стандарта	Ведение протоколов авторского надзора

В процессе эксплуатации не всегда отказ отдельного элемента приводит к прекращению выполнения функций СМС. Поэтому предлагается универсальная матрица рисков, позволяющая присвоить уровень критичности и определить тяжесть последствия нежелательного АС методом «анализа видов, последствий и критичности отказов» с учетом ГОСТа 27.310–95. С применением матрицы рисков в процессе проведения данного исследования были распределены вероятность и последствия отказов в баллах, что позволило выявить критичные элементы СМС с точки зрения влияния на их надежность [5].

Показатели безотказности целесообразно проводить с учетом критичности отказов на основании ГОСТа 27.003–2016. Совокупность признаков, характеризующих вероятность и последствия отказов, предлагается рассчитывать через «критичность отказов». Для унификации данных в качестве альтернативы балльной системе, в свою очередь, один балл риска равен 4 % критичности отказов. При этом показатель определяется с помощью следующего выражения:

$$C = V_1 V_2,$$

где C — критичность отказов, %;

V_1, V_2 — вероятность и последствия критичных элементов, которые могут характеризовать каждый тип нежелательного АС.

Для обеспечения надежности СМС на этапах проектирования, строительства и эксплуатации предлагаются программы, включающие три уровня оценки: *управление надежностью, управление ресурсом, управление рисками*. Общий вид многоуровневой системы оценки обеспечения надежности приведен на рис. 3.

⁵ ГОСТ Р 27.303–2021. Анализ видов и последствий отказов. Изд. офиц. М.: Российский институт стандартизации, 2021.

⁶ ГОСТ 27.310–95. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. Введ. 01.01.1997 г.



Рис. 3. Многоуровневая система обеспечения надежности судовых механических систем на этапах жизненного цикла

Кроме того, предлагаемая оценка позволяет обеспечить СМС дополнительными данными на этапе проектирования для подтверждения выбора элементов и, в свою очередь, в период постройки может рассматриваться для оценки элементов СМС при монтаже, а также на стадии эксплуатации позволяет учитывать планирование ТО и ремонтов.

Обсуждение (Discussion)

В процессе сравнения полученных результатов данного исследования с работами других авторов можно выделить следующее. В работе [6] рассматривается стохастическая модель для описания надежности на примере электроэнергетических транспортных систем. В частности, на определенном временном отрезке рассматривались следующие величины: частота отказов, интенсивность отказов, а также функция уровня отказов, являющаяся математическим пределом вероятности. Однако для СМС судов, эксплуатирующихся в полярных водах, эти величины необходимо рассматривать более подробно при управлении рисками. Поэтому в данном исследовании рекомендуется изучать их уже на этапах разработки в программе управления рисками.

В работе [7] рассматривается матрица, при которой компонентам судовой энергетической установки присваивается уровень опасности нежелательного события в соответствии с методами количественной оценки рисков и анализа характера отказов и их последствий.

Близкие технические решения к проведенным исследованиям предложены в работе [8] с применением метода риск-ориентированного подхода для выявления основных проблем торгового флота. Оценка риска эксплуатации судов является важным фактором для совершенствования норм и правил постройки новых судов, а также управления технической эксплуатацией существующих судов.

Ранее в публикации [9] уже были рассмотрены эксплуатационные этапы жизненного цикла СМС, выполнено сравнение событийных моделей изменения условий эксплуатации СМС, проанализированы модели временных срезов, соответствующие плановым ремонтам и техническому обслуживанию систем, замене их элементов и непредвиденным АС. Следует также отметить результаты исследований авторов настоящего исследования, выполненных ими в публикации [10], где был рассмотрен эксплуатационный этап жизненного цикла СМС по данным технического наблюдения.

Выводы (Summary)

Разработана многоуровневая система оценки обеспечения надежности СМС (см. рис. 3), в которой могут взаимодействовать показатели разных уровней:

- долговечность ↔ техническое обслуживание;
- безотказность ↔ технический мониторинг;
- ремонтпригодность ↔ плановый ремонт;
- назначенный ресурс ↔ вероятность отказов;
- коэффициент технического использования ↔ вероятность отказов;
- техническое обслуживание ↔ последствия отказов;
- классификационное освидетельствование ↔ виды отказов;
- оценка технического состояния ↔ назначенный ресурс;
- плановый ремонт ↔ причины отказов.

Проведенные исследования выполнены на базе анализа данных из практики эксплуатации судовых механических систем, необходимости предупреждения отказов и развития системы оценки рисков.

Результатом *уровня 1* является прогнозирование срока службы для календарной продолжительности эксплуатации, возобновление работоспособного состояния после ТО и ремонта. Предложена программа обоснования надежности судовых механических систем.

Результатом *уровня 2* является снижения вероятности отказов, сбор фактических данных о нарушении работоспособного состояния, оценка изменений условий эксплуатации СМС, улучшение организационно-технических мероприятий по ТО и ремонту. Предложена программа управления ресурсом судовых механических систем.

Результатом *уровня 3* является выявление потенциальных вероятностей и последствий отказов СМС, анализ статистики неисправностей, оценка регламентированных действий для ТО и ремонта. Предложена программа управления рисками судовых механических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плотников В. А. Транспортная стратегия России и новые задачи развития регионов / В. А. Плотников, С. И. Орешкин // Теория и практика сервиса: экономика, социальная сфера, технологии. — 2023. — № 1 (55). — С. 5–10. — EDN EPDDAM.
2. Смирнов А. Ю. План развития Северного морского пути до 2035 года как инструмент государственной инновационной политики / А. Ю. Смирнов // Вестник университета. — 2023. — № 4. — С. 57–64. DOI: 10.26425/1816-4277-2023-4-57-64. — EDN FHMMVA
3. Мосейко Е. С. Оценка надежности судовых механических систем для арктического судоходства / Е. С. Мосейко, Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 120–128. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-120-128. — EDN DAFZUP.
4. Мясников Ю. Н. Анализ и совершенствование методов проектного расчета надежности судовых электромеханических систем / Ю. Н. Мясников // Судостроение. — 2019. — № 6 (847). — С. 17–31. — EDN IJDYLI.
5. Мосейко Е. С. Задачи оценки рисков и предупреждения отказов судовых механических систем / Е. С. Мосейко, Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 6. — С. 931–944. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-931-944. — EDN MBUNDL.
6. Chiodo, E. Stochastic index definition and estimation for reliability and quality assessment of transportation systems / E. Chiodo, D. Lauria // Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion. — IEEE, 2012. — Pp. 1–5.
7. Медведев В. В. Определение тяжести последствий отказа элементов в процессе прогноза риска эксплуатации СЭУ / В. В. Медведев, Д. С. Семионичев // Судостроение. — 2013. — № 3(808). — С. 25–26. — EDN QBZLPV.
8. Егоров Г. В. Риск эксплуатации транспортных судов ограниченных районов плавания / Г. В. Егоров // Морской вестник. — 2010. — № 3(35). — С. 77–81. — EDN MWGMTD.

9. Мосейко Е. С. Применение структурных методов для оценки надежности судовых механических систем / Е. С. Мосейко, Е. О. Ольховик, Никифоров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 834–844. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-834-844. — EDN NBOOCB.

10. Мосейко Е. С. Исследование надежности судовых насосов по данным технического наблюдения / Е. С. Мосейко, Е. О. Ольховик // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2021. — № 4. — С. 7–16. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-4-7-16. — EDN IPBBXZ.

REFERENCES

1. Plotnikov, V. A. and Oreshkin, S. I. “Transportnaya strategiya Rossii i novye zadachi razvitiya regionov” / V. A. Plotnikov and S. I. Oreshkin. *Teoriya i praktika servisa: ekonomika, social'naya sfera, tekhnologii* 1(55) (2023): 5–10.

2. Smirnov, A. YU. “Plan razvitiya Severnogo morskogo puti do 2035 goda kak instrument gosudarstvennoj innovacionnoj politiki.” / A. YU Smirnov. *Vestnik universiteta* 4 (2023): 57–64. DOI: 10.26425/1816-4277-2023-4-57-64.

3. Mosejko, E. S. and Ol'hovik, E. O. “Ocenka nadezhnosti sudovyh mekhanicheskikh sistem dlya arkticheskogo sudohodstva.” / E. S. Mosejko and E. O. Ol'hovik. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 120–128. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-120-128.

4. Myasnikov, YU. N. “Analiz i sovershenstvovanie metodov proektnogo rascheta nadezhnosti sudovyh enegomekhanicheskikh sistem.” / YU. N. Myasnikov. *Sudostroenie* 6 (847) (2019): 17–31.

5. Mosejko, E. S. and Ol'hovik, E. O. “Zadachi ocenki riskov i preduprezhdeniya otkazov sudovyh mekhanicheskikh sistem” / E. S. Mosejko and E. O. Ol'hovik. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.6. (2022): 931–944. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-931-944.

6. Chiodo, Elio, and Davide Lauria. “Stochastic index definition and estimation for reliability and quality assessment of transportation systems” / Elio Chiodo and Lauria. Davide. *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*. IEEE, (2012): 1–5.

7. Medvedev, V. V., Semionichev, D. S. “Opredelenie tyazhesti posledstviy otkaza elementov v processe prognoza riska eksploatacii SEU.” *Sudostroenie* 3(808) (2013): 25–26.

8. Egorov, G. V. “Risk eksploatacii transportnyh sudov ogranichennyh rajonov plavaniya.” / G. V. Egorov, *Morskoy vestnik* 3(35) (2010): 77–81.

9. Mosejko, E. S., Ol'hovik, E. O., and Nikiforov, V. G. “Primenenie strukturnykh metodov dlya ocenki nadezhnosti sudovyh mekhanicheskikh sistem” / E. S. Mosejko, E. O. Ol'hovik and V. G. Nikiforov, *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.5 (2023): 834–844. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-834-844.

10. Mosejko, E. S. and Ol'hovik, E. O. “Issledovanie nadezhnosti sudovyh nasosov po dannym tekhnicheskogo nablyudeniya” / E. S. Mosejko and E. O. Ol'hovik. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* 4 (2021): 7–16. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-4-7-16.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мосейко Евгений Сергеевич — инженер-технолог отдела технологии, экономики производства, нормирования материалов АО «Центральное конструкторское бюро «Айсберг» 199034, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Большой пр., 36

e-mail: evgeniy-mosejko@mail.ru

Ольховик Евгений Олегович — доктор технических наук, доцент ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7

e-mail: olhovikeo@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mosejko, Evgeniy S. — Process Engineer of the Department of Technology, Industrial Economy and Materials Rationing “Iceberg” Central Design Bureau 36 Bol'shoi Ave., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

e-mail: evgeniy-mosejko@mail.ru

Ol'khovik, Evgeniy O. — Dr. of Technical Sciences, associate professor Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation

e-mail: olhovikeo@gumrf.ru

Рудь Василий Юрьевич —
доктор физико-математических наук,
доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_vsi@gumrf.ru

Rud Vasily Y. —
Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_vsi@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 18 сентября 2024 г.
Received: September 18, 2024.*

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-784-794

PATTERNS OF LEAN METHANE-AIR MIXTURES COMBUSTION IN PISTON ENGINE

I. R. Galiev

St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russian Federation

The article is devoted to the study of the patterns of combustion of lean methane-air mixtures in marine internal combustion engine. Literature review shows that the implementation of combustion technology for a homogeneous lean methane-air mixture will increase the compression ratio, reduce fuel consumption and improve the environmental engine performance. However due to an increase in misfires and a decrease in the speed of flame propagation, the combustion of lean methane-air mixtures remains an unresolved problem. The article studies the influence of the excess air coefficient (from 1 to 1.4) on the turbulent combustion regime (assessed by the Karlowitz and Damkoehler criteria), the completeness and rate of fuel combustion. It was revealed that depletion of the air-fuel mixture under conditions of intense turbulence leads to an increase in the Karlowitz criterion and a decrease in the Damköhler criterion. This indicates that the rate of chemical reactions in the flame front decreases, as a result of which the combustion process is characterized by stretching and rupture of the flame front. Therefore, to intensify the combustion of lean methane-air mixtures, it is advisable to increase the average speed of the vortex flow, and not the intensity of turbulence. A study of the influence of the excess air coefficient on the completeness and rate of fuel combustion showed that depletion of the mixture leads to a decrease in the completeness of fuel combustion from 93.5 % (at $\alpha=1$) to 83 % (at $\alpha=1.4$). The combustion rates also decrease and their maximum values shift from 13° (at $\alpha=1$) to 24° (at $\alpha=1.4$) degrees after top dead center. Therefore for efficient engine operation on lean mixtures, it is necessary to increase the fuel combustion rate through additional swirling of the gas-air mixture or the use of combustion promoters.

Key words: methane-air mixture, gas piston engine, excess air coefficient, Karlowitz number, Damkoehler number, Borghi-Peters diagram, indicator diagram, completeness of fuel combustion, combustion rate.

For citation:

Galiev, Ildar R. "Patterns of lean methane-air mixtures combustion in piston engine" *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.5 (2024): 784–794. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-784-794.

УДК 621.43.074

ЗАКОНОМЕРНОСТИ СЖИГАНИЯ БЕДНЫХ МЕТАНОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

И. Р. Галиев

Санкт-Петербургский государственной морской технической университет,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Статья посвящена изучению закономерностей сжигания бедных метановоздушных смесей в судовых двигателях внутреннего сгорания. Выполненный обзор литературы показал, что реализация технологии сжигания гомогенной бедной метановоздушной смеси позволит повысить степень сжатия, снизить расход топлива и улучшить экологические показатели двигателя. Однако, из-за увеличения пропусков зажигания и снижения скорости распространения пламени, сжигание бедных метановоздушных смесей остается пока нерешенной задачей. В статье изучено влияние коэффициента избытка воздуха (от 1 до 1,4) на режим турбулентного горения (оцениваемый критериями Карловица и Дамкелера), а также полноту и скорость сгорания топлива. Выявлено, что обеднение топливовоздушной смеси в условиях интенсиф-

ной турбулентности приводит к увеличению критерия Карловица и уменьшению критерия Дамкелера, что свидетельствует об уменьшении скорости химических реакций во фронте пламени. В результате процесс сгорания характеризуется растяжениями и разрывами фронта пламени. Поэтому для интенсификации сгорания бедных метановоздушных смесей целесообразно увеличивать среднюю скорость вихревого потока, а не интенсивность турбулентности. Изучение влияния коэффициента избытка воздуха на полноту и скорость сгорания топлива показало, что обеднение смеси приводит к уменьшению полноты сгорания топлива с 93,5 % (при $\alpha = 1$) до 83 % (при $\alpha = 1,4$). Значения скорости сгорания также уменьшается, а их максимальные значения смещаются с 13° (при $\alpha = 1$) до 24° (при $\alpha = 1,4$) градусов после верхней мертвой точки. Сделан вывод о том, что для эффективной работы двигателя на бедных смесях необходимо увеличивать скорость сгорания топлива за счет дополнительной закрутки газозвушной смеси или применения промоторов горения.

Ключевые слова: метановоздушная смесь, газопоршневой двигатель, коэффициент избытка воздуха, критерий Карловица, критерий Дамкелера, диаграмма Borghi — Peters, индикаторная диаграмма, полнота сгорания топлива, скорость сгорания.

Для цитирования:

Галиев И. Р. Закономерности сжигания бедных метановоздушных смесей в поршневых двигателях / И. Р. Галиев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 5. — С. 784–794. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-784-794.

Введение (Introduction)

В связи с постоянным ростом цен на судовое топливо и законодательным ужесточением экологических требований к отработавшим газам двигателей внутреннего сгорания (ДВС) с каждым годом наблюдается рост популярности применения в качестве топлива метана (природного газа). К положительным свойствам природного газа относят: высокое октановое число (105–110); низкую (по сравнению с бензином и дизельным топливом) стоимость; низкую токсичность отработавших газов; широкие концентрационные пределы воспламенения и распространения пламени; повышение ресурса моторного масла; снижение эксплуатационных расходов судна (20–50 %). Поэтому многие мировые (MTU, MAN, Wartsila и др.) и отечественные (Коломенский завод, РУМО, Волжский дизель и др.) производители судовых двигателей имеют в своей линейке газопоршневые двигатели. Аналитические^{1,2} и научные [1]–[3] обзоры показывают, что использование природного газа в судовом двигателестроении будет с каждым годом расти. Поэтому исследования в данной области являются актуальной задачей. При конвертации дизелей на природный газ их дополнительно оснащают системой зажигания топлива и газобаллонным оборудованием. Для исключения возникновения детонации метана уменьшают степень сжатия двигателя с помощью фрезеровки поршней, установки дополнительной прокладки под головку блока цилиндров, укорочения стержня шатуна, установки новых поршней с оптимизированной для сжигания природного газа формой днища поршня. Штатная камера сгорания конвертируемого на природный газ дизельного двигателя оптимизирована для впрыска и последующего гетерогенного сгорания дизельного топлива. Для эффективной работы газового ДВС необходимо изменить форму днища поршня, чтобы получить характеристики турбулентности потока, обеспечивающие низкую токсичность отработавших газов и высокий КПД двигателя.

Сжигание гомогенных стехиометрических смесей метана в судовых двигателях с искровым зажиганием является достаточно распространенным решением [4]. Вместе с тем модернизация двигателей внутреннего сгорания, направленная на снижение расхода топлива, требует создания технологии сжигания бедных топливовоздушных смесей [5]. Использование бедной топливовоздушной смеси уменьшает склонность к детонации, поэтому становится возможной работа ДВС с высокими степенями сжатия ($\epsilon > 12$). Кроме того, снижается эмиссия оксидов азота, поскольку бедная смесь приводит к уменьшению теплоты сгорания топлива и, следовательно, температуры пламени. Однако при коэффициенте избытка воздуха α больше единицы наблюдается уменьшение

¹ СПГ как судовое топливо. Информационный бюллетень. СПб: Газпром экспорт, 2021. 24 с.

² Информационно-справочный материал о мировых тенденциях развития применения СПГ в качестве топлива на водном транспорте. Газпром, 2019. 73 с.

концентрации топлива и, как следствие, уменьшение скорости распространения пламени, увеличение времени сгорания и цикловой неидентичности рабочего процесса. Также анализ публикаций выявил, что одним из недостатков применения бедных метановоздушных является сложность использования трехкомпонентного каталитического нейтрализатора из-за наличия кислорода в выхлопных газах. Все это указывает на то, что реализация технологии сжигания гомогенной бедной метановоздушной смеси остается все еще нерешенной задачей.

При работе газопоршневого двигателя на бедных топливовоздушных смесях увеличение скорости и турбулентности потока может обеспечить устойчивую работу двигателя, поскольку крупномасштабные турбулентные потоки, формируемые в камере сгорания двигателя, в значительной степени влияют на скорость распространения пламени, полноту сгорания топлива и эмиссию вредных веществ. Однако избыточная турбулентность может привести к гашению пламени. Поэтому при профилировании впускных каналов и формы камеры сгорания необходимо глубокое понимание процесса распространения метановоздушного пламени и его взаимодействия с турбулентными вихрями. Большой вклад в изучение закономерностей процесса сгорания бедных топливовоздушных смесей в условиях интенсивной турбулентности внесли ученые из Honda R&D [6]. При работе двигателя с $\alpha = 1,47$ была выявлена нестабильность горения топлива, выраженная в изменении трехмерной структуры пламени (т. е. размера и формы фронта пламени) в каждом цикле работы двигателя.

Применение оптических методов диагностики показало, что ядро пламени в первой фазе сгорания, т. е. у электродов свечи зажигания, имеет несферическую форму, что указывает на сильное влияние крупномасштабных турбулентных вихрей. Вращательное движение вихревого потока поперек оси цилиндра (в англоязычной литературе именуемым «tumble») способствует перемещению ядра пламени из межэлектродного зазора свечи зажигания в объем камеры сгорания, что приводит к уменьшению продолжительности первой фазы сгорания. Была выявлена корреляция между скоростью пламени и средней скоростью вихревого потока вблизи свечи зажигания. Увеличение средней скорости вихревого потока и интенсивности турбулентности приводит к увеличению скорости распространения пламени и уменьшению общей продолжительности сгорания.

Аналогичные результаты, полученные учеными из Национального университета Чунгнам (Ю. Корея) [7] и Научно-исследовательского института перспективных исследований (AMRI) [8], выявили следующее: турбулентность, генерируемая пламенем, выше при сжигании стехиометрических смесей в отличие от бедных; усиление турбулентности (за счет профилирования впускного канала) уменьшает продолжительность сгорания бедной топливовоздушной смеси ($\alpha = 1,2$); обеднение горючей смеси приводит к уменьшению скорости распространения пламени. Одной из проблем сгорания бедных смесей является нестабильность сгорания и пропуски зажигания при увеличении коэффициента избытка воздуха. Исследования, проведенные в Высшей школе науки и технологий университета Кейо (Япония), показали эффективность использования системы зажигания с увеличенной энергией искрового разряда и многократного искрового разряда для интенсификации химических процессов в первой фазе сгорания бедной топливовоздушной смеси [9]. При этом авторы исследования отмечают, что увеличение скорости распространения пламени в первой фазе сгорания способствует интенсификации сгорания во второй фазе сгорания и уменьшению общей продолжительности сгорания. Таким образом, анализ литературы показал перспективность применения гомогенных бедных метановоздушных смесей в судовых двигателях. Исследованиями в данной области занимаются ученые ведущих мировых университетов и технологических компаний. Создание эффективной технологии сжигания бедных смесей требует глубокого понимания механизма распространения пламени и взаимодействия его с характеристиками турбулентности.

Целью работы является изучение влияния коэффициента избытка воздуха α от 1 до 1,4 на режим турбулентного горения, оцениваемый критериями Карловица и Дамкелера, а также полноту и скорость сгорания топлива.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Работа проводилась с использованием исследовательского одноцилиндрового двигателя марки «УИТ-85». Данный тип двигателя обладает низкой цикловой неидентичностью, что позволяет получить высокую точность измерений. Частота вращения коленчатого вала $n = 900$ мин⁻¹. Угол опережения зажигания был равен 13° до верхней мертвой точки (ВМТ). В качестве топлива использовался сжатый природный газ с содержанием метана более 95 %. Коэффициент избытка воздуха рассчитывался по формуле

$$\alpha = \frac{G_{air}}{G_{cng} l_{cng}},$$

где G_{air} — расход воздуха, кг/ч;

G_{cng} — расход природного газа, кг/ч;

l_{cng} — теоретически необходимое количество воздуха для сжигания 1 кг природного газа.

Изменение коэффициента избытка воздуха осуществлялось увеличением / уменьшением расхода природного газа, при этом расход воздуха не изменялся и был равен $G_{air} = 14$ кг/ч.

Регистрация давления в камере сгорания проводилась пьезоэлектрическим датчиком давления. Определение скорости и ширины пламени осуществлялось с применением двух ионизационных датчиков, расположенных в цилиндре двигателя. Более подробно методика проведения экспериментов, схема подачи природного газа в двигатель и схема обработки сигналов с датчика давления и ионизационных датчиков изложены в ранее опубликованных работах [10], [11].

Пульсационная скорость рассчитывалась с использованием значений кинетической энергии турбулентности k :

$$U' = \sqrt{\frac{2k}{3}}.$$

Определение масштабов турбулентности выполнялось с применением первой гипотезы Колмогорова по формулам:

$$L_i = \frac{kU'}{\varepsilon};$$

$$\eta = \left(\frac{v^3}{\varepsilon} \right)^{0,25},$$

где L_i — интегральный масштаб турбулентности;

η — масштаб Колмогорова;

v — кинематическая вязкость;

ε — скорость диссипации энергии.

Вычисление характеристик турбулентности (k и ε) в цилиндре двигателя выполнено в работе с использованием $k - \omega$ SST (*Shear Stress Transport*) модели турбулентности в интервале углов положения коленчатого вала от -15° до 50° после ВМТ. Модель турбулентности является комбинацией двух типов моделей: стандартной $k - \varepsilon$, используемой для моделирования турбулентности в объеме камеры сгорания и $k - \omega$ модели Уилкокка, применяемой для моделирования пристеночной турбулентности [13]:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho k W_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \rho P_k - \rho C_\mu k \omega;$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho \omega W_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + (1 - F_1) 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \alpha_3 \frac{\omega}{k} \rho P_k - \rho \beta_3 \omega^2,$$

где k — кинетическая энергия турбулентности;
 μ_t — турбулентная вязкость;
 σ_{k3} и $\sigma_{\omega3}$ — эмпирические константы;
 P_k — скорость генерации турбулентной энергии;
 C_μ — константа, $C_\mu = 0,0845$;
 ω — величина, обратная времени жизни крупных вихрей;
 F_1 — функция-переключатель;
 α_3 — обратное число Прандтля;
 β_3 — эмпирический коэффициент.

Выбор k - ω SST модели турбулентности обусловлен результатами численных экспериментов и их сравнением с экспериментальными данными. Таким образом, физико-математические и численные подходы, используемые в работе, являются современными и хорошо зарекомендовали себя при решении задач моделирования турбулентности в ДВС.

Результаты (Results)

Влияние коэффициента избытка воздуха на режим горения. Проведенные исследования показали, что вихревые потоки в цилиндре ДВС характеризуются значительной турбулентностью. Турбулентность играет важную роль в приготовлении топливно-воздушной смеси и ее последующем сгорании. Вихри движутся в случайных направлениях, улучшая перемешивание топлива и воздуха. Когда топливно-воздушная смесь воспламеняется, пламя распространяется в условиях интенсивной турбулентности. В отличие от ламинарного пламени, скорость которого можно охарактеризовать исключительно химическими свойствами горючего и окислителя, т. е. воздуха, турбулентную скорость горения определить гораздо труднее. Это связано с тем, что она зависит от характеристик турбулентности вихревого потока в цилиндре ДВС, которые, в свою очередь, зависят от конструкции впускного канала, формы поршня и головки блока цилиндров. Турбулентность можно определить как колеблющуюся составляющую скорости, добавляемую к средней скорости потока. Скорость, температура и давление в условиях интенсивной турбулентности изменяются неравномерно. Это приводит к тому, что площадь поверхности пламени представляет собой искривленный фронт пламени, что увеличивает массовую скорость сгорания.

Влияние коэффициента избытка воздуха на режим горения рассматривается с применением диаграммы *Borghi — Peters* (рис. 1).

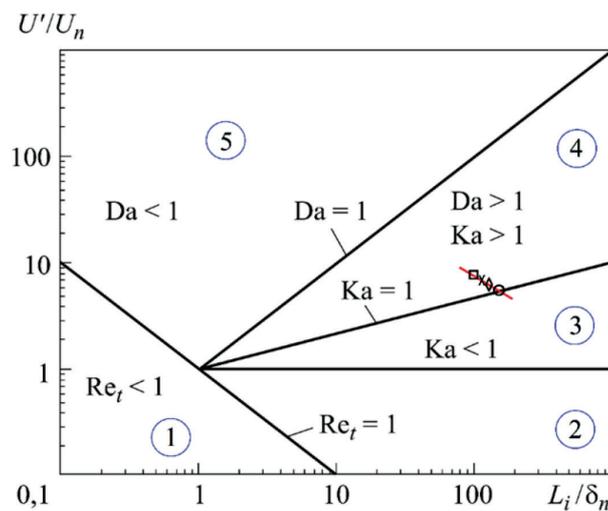


Рис. 1. Диаграмма *Borghi-Peters*: \circ — $\alpha=1$; \diamond — $\alpha=1,2$; \times — $\alpha=1,3$; \square — $\alpha=1,4$

Условные обозначения:

- 1 — зона ламинарного пламени; 2 — зона искривленного фронта ламинарного пламени;
- 3 — зона начала разрыва фронта пламени; 4 — зона разорванного фронта пламени;
- 5 — реактор идеального перемешивания

Данная диаграмма наглядно показывает влияние физико-химических факторов на процесс горения [13]. Линии на диаграмме разделяют процесс горения на пять основных зон: ламинарный пламя; искривленный фронт ламинарного пламени; начало разрыва фронта пламени; разорванный фронт пламени; реактор идеального перемешивания. В зоне 1 интенсивность турбулентности настолько мала, что турбулентное число Рейнольдса $Re_t < 1$, поэтому пламя является ламинарным. Напротив, в зоне 5 турбулентность потока настолько сильная, что зона химических реакций сильно размывается (критерий Дамкелера $Da < 1$, критерий Карловица $Ka \gg 1$). Данный режим получил название *реактора идеального перемешивания*. Отметим, что для газопоршневых двигателей режимы «1» и «5» не наблюдаются. В зоне 2 поверхность фронта пламени деформируется турбулентным потоком. При этом вихри масштаба Колмогорова достаточно велики по сравнению с зоной химических реакций ($Ka < 1, Da \gg 1$), чтобы проникнуть в структуру пламени и влиять на процессы термодиффузии в нем (рис. 2, а). В зоне 3 усиление интенсивности турбулентности приводит к разрыву фронта пламени, при этом на зону химических реакций и зону подогрева турбулентные вихри не оказывают влияния. В данном режиме площадь поверхности пламени значительно увеличивается, что приводит к увеличению скорости сгорания топлива в двигателе. На линии раздела зон 3 и 4 вихри масштаба Колмогорова имеют тот же порядок, что и общая толщина пламени, т. е. $Ka = 1$.

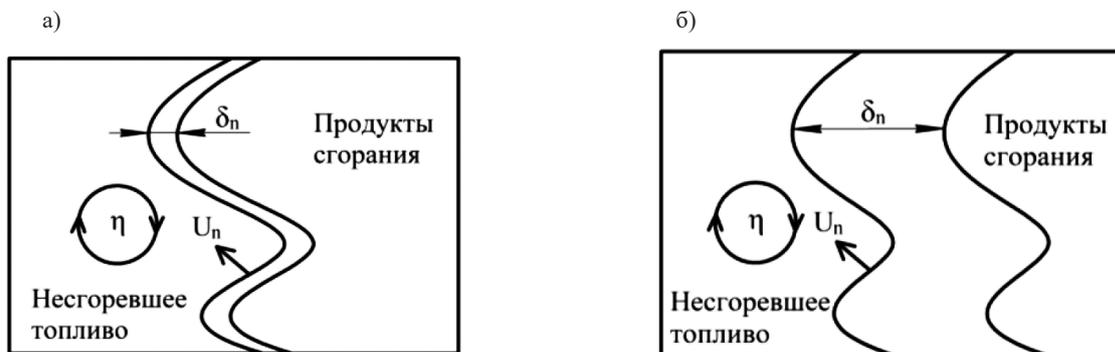


Рис. 2. Влияние коэффициента избытка воздуха на структуру пламени:
 а — $\alpha = 1$; б — $\alpha = 1,4$

В зоне 4 турбулентные вихри начинают влиять на область предварительного нагрева топлива перед фронтом пламени ($Ka > 1$). В результате поступление несгоревшего топлива в область предварительного нагрева будет увеличиваться, а сама область расширяться. Увеличение ширины зоны химических реакций пламени, вызванное обеднением топлива, приводит к тому, что влияние турбулентности на зону химических реакций будет усиливаться и может привести к прекращению горения (рис. 2, б). Для численной оценки режима горения топлива в ДВС используют критерии Дамкелера (Da) и Карловица (Ka). Критерий Карловица широко применяется в физике горения в качестве оценочного фактора для определения условий прекращения горения за счет растяжения пламени при большой интенсивности турбулентности [14], [15]. Следует отметить, что для изучения механизма погасания пламени, из-за тепловых потерь при малой интенсивности турбулентности, необходимо использовать число Пекле, равное отношению конвективного переноса тепла к молекулярному. Критерий Ka рассчитывают как отношение характерного времени химической реакции к характерному времени течения:

$$Ka = \frac{T_n}{T_K} = \frac{\delta_n^2}{\eta^2},$$

где T_n — масштаб времени ламинарного пламени;
 T_K — масштаб времени Колмогорова;
 δ_n — ширина ламинарного фронта пламени;
 η — масштаб Колмогорова.

Критерий Дамкелера представляет собой отношение характерного масштаба времени турбулентности T_{flow} к характерному химическому масштабу времени T_{chem} . Большие значения Da свидетельствуют о значительной разнице между химическим и турбулентным масштабами времени. Это означает, что химические реакции протекают быстрее по сравнению с турбулентным потоком, поэтому турбулентные вихри, искривляя поверхность фронта пламени, не оказывают существенного влияния на структуру зоны химических реакций:

$$Da = \frac{T_{flow}}{T_{chem}} = \frac{L_i U_n}{\delta_{II} U'}$$

где T_{flow} — масштаб времени турбулентности;

T_{chem} — продолжительность химических реакций во фронте пламени;

U_n — нормальная (ламинарная) скорость распространения пламени;

L_i — интегральный масштаб турбулентности;

U' — пульсационная скорость воздушного потока.

На рис. 3 показана зависимость критериев Ka и Da от коэффициента избытка воздуха, откуда видно, что обеднение топливовоздушной смеси в условиях интенсивной турбулентности приводит к увеличению критерия Ka с 1,2 (при $\alpha = 1$) до 3,4 (при $\alpha = 1,4$) и уменьшению Da с 37 (при $\alpha = 1$) до 12 (при $\alpha = 1,4$). Расчетные точки, определяющие режим горения на диаграмме *Borghì — Peters*, смещаются из зоны 3 (начало разрыва фронта пламени) в зону 4 (разорванный фронт пламени). Это свидетельствует о том, что уменьшается скорость химических реакций во фронте пламени, что приводит к его растяжению, т. е. увеличению ширины зоны химических реакций, и разрыву. При числах $Ka > 5$ и $Da < 10$ происходит прекращение горения. Таким образом, для интенсификации сгорания бедных метановоздушных смесей, характеризующихся увеличенной шириной зоны химических реакций, целесообразно увеличивать среднюю скорость вихревого потока, а не интенсивность турбулентности.

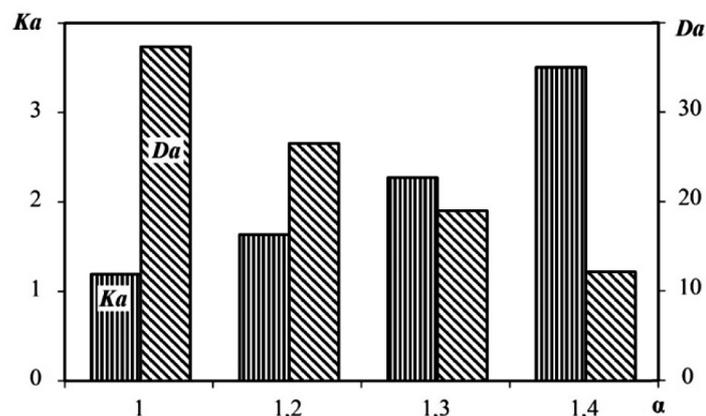


Рис. 3. Зависимость критериев Ka и Da от коэффициента избытка воздуха

Влияние коэффициента избытка воздуха на полноту, скорость и температуру сгорания топлива. Расчет полноты сгорания топлива осуществлялся с применением экспериментальной индикаторной диаграммы давления и использованием уравнения первого закона термодинамики:

$$\chi = \frac{dQ}{H_u G_{II}} 100 \%$$

$$dQ = dU + pdV,$$

где Q — количество теплоты, затрачиваемой на совершение работы и увеличение внутренней энергии;

H_u — теплота сгорания топлива;

G_u — цикловая подача топлива;
 dU — внутренняя энергия;
 p — давление в камере сгорания;
 V — объем камеры сгорания.

Температура в камере сгорания рассчитывалась с применением уравнения состояния реального газа по формулам:

$$T = \frac{pV}{GR};$$

$$R = R_u(1 - \gamma) + R_b;$$

$$R_u = \frac{R_{cng} G_{cng} + R_{air} G_{air} + R_b \gamma (G_{cng} + G_{air})}{G_{cng} + G_{air} + \gamma (G_{cng} + G_{air})};$$

$$R_b = \frac{R_{CO} G_{CO} + R_{CO_2} G_{CO_2} + R_{H_2} G_{H_2} + R_{H_2O} G_{H_2O} + R_{N_2} G_{N_2} + R_{O_2} G_{O_2}}{G_{CO} + G_{CO_2} + G_{H_2} + G_{H_2O} + G_{N_2} + G_{O_2}},$$

где G — масса рабочего тела в камере сгорания;
 R — газовая постоянная смеси газов;
 R_u — газовая постоянная несгоревшей топливовоздушной смеси;
 R_b — газовая постоянная отработавших газов;
 γ — коэффициент остаточных газов.

Скорость сгорания метановоздушной смеси рассчитывалась по формуле

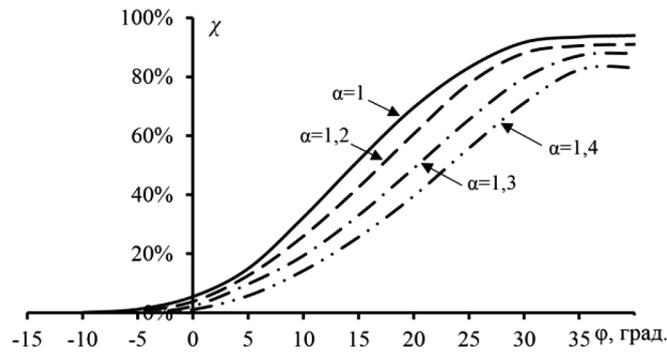
$$w = \frac{d\chi}{d\varphi} = 6,908 \frac{m+1}{\varphi_z} \left(\frac{\varphi}{\varphi_z} \right)^m \cdot \exp \left[-6,908 \left(\frac{\varphi}{\varphi_z} \right)^{m+1} \right],$$

где φ — угол поворота коленчатого вала двигателя;
 φ_z — продолжительность сгорания топлива;
 m — показатель сгорания.

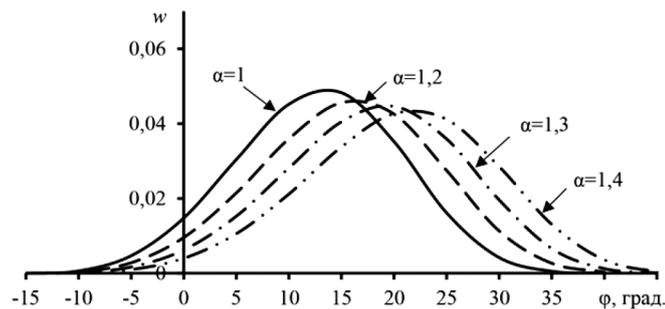
На рис. 4 показано влияние коэффициента избытка воздуха на полноту, скорость и температуру сгорания топлива в камере сгорания двигателя. При обеднении смеси наблюдается уменьшение полноты сгорания топлива (рис. 4, а) с 93,5 % (при $\alpha = 1$) до 83 % (при $\alpha = 1,4$). Это связано с тем, что обеднение смеси приводит к уменьшению количества выделившегося при сгорании тепла и скорости химических реакций в фронте пламени, в результате процесс сгорания топлива становится более продолжительным. На рис. 4, б видно, что при обеднении смеси с $\alpha = 1$ до $\alpha = 1,4$ значения скоростей сгорания уменьшаются, а их максимальные значения, т. е. число активных центров химических реакций, смещаются на 11° после ВМТ. Догорание топлива при $\alpha > 1,1$ происходит во время такта расширения, т. е. уменьшающихся значений давлений и температур и увеличивающейся площади и объема камеры сгорания. При $\alpha > 1,5$ значение тепловыделения во фронте пламени становится меньше теплоотдачи в холодные стенки цилиндра, критерий $Ka > 5$, критерий $Da < 10$, и пламя гаснет. Поэтому для эффективной работы двигателя на бедных смесях необходимо увеличивать угол опережения зажигания, скорость сгорания топлива за счет дополнительной закрутки газовой смеси (например, использования поршней с большим *squish*-отношением) и скорость химических реакций за счет применения промоторов горения (например, водорода).

Следует отметить, что сжигание бедных смесей имеет и положительный эффект. В частности, на рис. 4, в показано уменьшение температуры в камере сгорания с $T = 2047$ К (при $\alpha = 1$) до $T = 1665$ К при ($\alpha = 1,4$). В результате уменьшается концентрация оксидов азота, образующихся по термическому механизму Я. Б. Зельдовича и уменьшается теплонапряженность деталей цилиндропоршневой группы.

а)



б)



в)

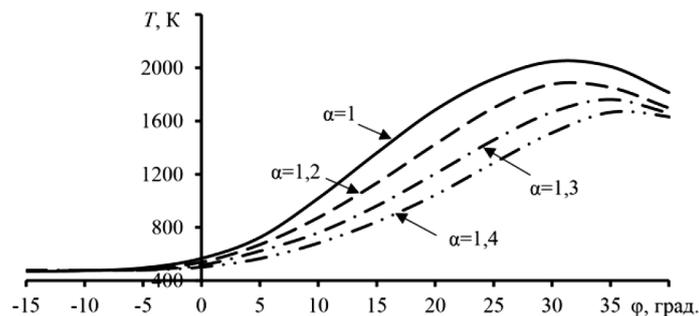


Рис. 4. Влияние коэффициента избытка воздуха:
а — на полноту сгорания топлива; б — на скорость сгорания топлива;
в — на температуру в камере сгорания

Таким образом, изучение влияния коэффициента избытка воздуха на полноту, скорость и температуру сгорания топлива показало, что обеднение смеси с $\alpha = 1$ до $\alpha = 1,4$ приводит к уменьшению полноты сгорания топлива на 10,5 %, скорости сгорания на 14 % и температуры на 18,6 %.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы

1. Выявлено, что обеднение топливовоздушной смеси в условиях интенсивной турбулентности приводит к увеличению критерия Карловица с 1,2 (при $\alpha = 1$) до 3,4 (при $\alpha = 1,4$) и уменьшению критерия Дамкелера с 37 (при $\alpha = 1$) до 12 (при $\alpha = 1,4$). Это свидетельствует о том, что уменьшается скорость химических реакций во фронте пламени, в результате процесс сгорания характеризуется растяжениями и разрывами фронта пламени. Поэтому для интенсификации сгорания бедных метановоздушных смесей целесообразно увеличивать среднюю скорость вихревого потока, а не интенсивность турбулентности.

2. Исследование закономерностей влияния коэффициента избытка воздуха на полноту и скорость сгорания топлива показало, что обеднение смеси приводит к уменьшению полноты

сгорания топлива с 93,5 % (при $\alpha = 1$) до 83 % (при $\alpha = 1,4$). Значения скоростей сгорания также уменьшаются, а их максимальные значения смещаются на 11° после ВМТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Безюков О. К.* Газомоторное топливо на водном транспорте / О. К. Безюков, В. А. Жуков, О. И. Ященко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6. — С. 31–39. — EDN TDOCEH.
2. *Арабова З. М.* Анализ возможности перевода водного транспорта на сжиженный природный газ / З. М. Арабова, М. Ш. Арабов, А. А. Волкова, П. А. Саадати // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2021. — № 3. — С. 60–73. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-3-60-73. — EDN ORSAMW.
3. *Ватолин Д. С.* Оценка эффективности топливоподготовки на судах, использующих в качестве топлива сжиженный природный газ / Д. С. Ватолин // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 501–512. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-501-512. — EDN RRSEXY.
4. *Живлюк Г. Е.* Экологическая безопасность энергетических установок: двухтопливные и газовые двигатели / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 449–462. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-449-462. — EDN IWDJGT.
5. *Shouvik D.* An Investigation of Premixed and Lean Combustion in Engines. Grand PhD diss. University of Windsor. — 2018. — 229 p.
6. *Aleiferis P. G.* Cyclic Variations of Initial Flame Kernel Growth in a Honda VTEC-E Lean-Burn Spark-Ignition Engine / P. G. Aleiferis // SAE Technical Paper. — Is. 2000-01-1207. — 2000. — P. 112–149. DOI: 10.4271/2000-01-1207.
7. *Kang K. Y.* The Effects of Tumble Flow on Lean Burn Characteristics in a Four-Valve SI Engine / K. Y. Kang // SAE Technical Paper. — Is. 970791. — 1997. — P. 981–989. DOI: 10.4271/970791.
8. *Arcoumanis C.* Flow and Combustion in a Four-Valve, Spark-Ignition Optical Engine / C. Arcoumanis // SAE Transactions. — 1994. — Is. 940475. — P. 197–211. DOI: 10.4271/940475.
9. *Jung D.* An Investigation of Multiple Spark Discharge Using MultiCoil Ignition System for Improving Thermal Efficiency of Lean SI Engine Operation / D. Jung, N. Iida // Applied Energy. — 2018. — Is. 212. — P. 322–332. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.12.032.
10. *Шайкин А. П.* Характеристики распространения пламени и их влияние на образование несгоревших углеводородов и оксида азота в отработавших газах при добавке водорода в топливно-воздушную смесь энергетических установок с искровым зажиганием / А. П. Шайкин, П. В. Ивашин, И. Р. Галиев. — Самара: СНЦ РАН, 2016. — 259 с. — EDN YTM MVB.
11. *Shaikin A. P.* On the relationship of the width of the turbulent combustion zone with the fuel composition, pressure, propagation speed, and electrical conductivity of the flame / A. P. Shaikin, I. R. Galiev // Technical Physics. — 2020. — № 7. — P. 1020–1023. DOI: 10.1134/S106378422007018X.
12. *Галиев И. П.* CFD-моделирование газодинамических процессов при профилировании камеры сгорания газопоршневого двигателя / И. П. Галиев. — СПб.: СПбГМТУ, 2024. — 104 с. — EDN BVJGON.
13. *Lorenzo M. D.* New One Shot Engine Validation Based on Aerodynamic Characterization and Preliminary Combustion Tests / M. D Lorenzo // Flow Turbulence and Combustion. — 2021. — Is. 106. — P. 1801–1810. DOI:10.1007/s10494-020-00185-3.
14. *Baratta M.* CFD modelling of natural gas combustion in IC engines under different EGR dilution and H₂-doping conditions / M. Baratta // Transportation Engineering. — 2020. — Is. 2. — 12 p. DOI: 10.1016/j.treng.2020.100018.
15. *Chung Y. H.* Fire Safety Evaluation of High-Pressure Ammonia Storage Systems / Y. H. Chung // Energies. — 2022. — Is. 15. — P. 1123–1134. DOI: 10.3390/en15020520.

REFERENCES

1. Bezyukov, O. K., V. A Zhukov and O. I. Yashchenko “Dual-fuel engines on water transport.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*. 6.28 (2014): 31–39. — EDN TDOCEH.

2. Arabova, Z. M., M. Sh. Arabov, A. A. Volkova and P. A. Saadati “Analysis of conversion of water transport engines to liquefied natural gas.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 3 (2021):60–73. DOI:10.24143/2073-1574-2021-3-60-73.
3. Vatolin, Dmitrii S. “Efficiency of fuel gas supply on LNG-fueled vessels.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.3 (2023): 501–512. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-501-512.
4. Zhivljuk, Grigorij E., and Aleksandr P. Petrov. “Environmental safety of power plants: dual-fuel and gas engines.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.3 (2022): 449–462. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-449-462.
5. Shouvik, D. *An Investigation of Premixed and Lean Combustion in Engines*. University of Windsor, 2018.
6. Aleiferis, P.G. “Cyclic Variations of Initial Flame Kernel Growth in a Honda VTEC-E Lean-Burn Spark-Ignition Engine.” *SAE Technical Paper*. 2000–01–1207. (2000): 112–149. DOI: 10.4271/2000-01-1207.
7. Kang K. Y. “The Effects of Tumble Flow on Lean Burn Characteristics in a Four-Valve SI Engine.” *SAE Technical Paper*. 970791. (1997): 981–989. DOI: 10.4271/970791.
8. Arcoumanis C. “Flow and Combustion in a Four-Valve, Spark-Ignition Optical Engine.” *SAE Transactions*. 940475. (1994): 197–211. DOI: 10.4271/940475.
9. Jung D. “An Investigation of Multiple Spark Discharge Using MultiCoil Ignition System for Improving Thermal Efficiency of Lean SI Engine Operation.” *Applied Energy*. 212. (2018): 322–332. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.12.032.
10. Shaikin Alexander, Pavel Ivashin and Ildar Galiev “Kharakteristiki rasprostraneniya plameni i ikh vliyaniye na obrazovaniye nesgorevshikh uglevodorodov i oksida azota v otrabotavshikh gazakh pri dobavke vodoroda v toplivno-vozdushnyuyu smes’ energeticheskikh ustanovok s iskrovym zazhiganiyem.” / Samara: SNTS RAN, 2016.
11. Shaikin A. P., Galiev I. R. “On the relationship of the width of the turbulent combustion zone with the fuel composition, pressure, propagation speed, and electrical conductivity of the flame.” *Technical Physics*. 65.7. (2020): 1020–1023. DOI: 10.1134/S106378422007018X.
12. Galiyev Ildar *CFD-modelirovaniye gazodinamicheskikh protsessov pri profilirovanii kamery sgoraniya gazoporshnevoogo dvigatelya*. St. Petersburg: SPbGMTU, 2024.
13. Lorenzo M. D. “New One Shot Engine Validation Based on Aerodynamic Characterization and Preliminary Combustion Tests.” *Flow Turbulence and Combustion*. 106. (2021): 1801–1810. DOI:10.1007/s10494-020-00185-3.
14. Baratta M. “CFD modelling of natural gas combustion in IC engines under different EGR dilution and H₂-doping conditions.” *Transportation Engineering*. 2. (2020): 2–12. DOI: 10.1016/j.treng.2020.100018.
15. Chung Y. H. “Fire Safety Evaluation of High-Pressure Ammonia Storage Systems.” *Energies*. 15. (2022): 1123–1134. DOI: 10.3390/en15020520.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Галиев Ильдар Ринатович —
канд. техн. наук, доцент
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственной морской технической
университет»,
190121, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Лощманская, 3
e-mail: sbs777@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Galiev Ildar Rinatovich —
Ph.D., Associate Professor
St. Petersburg State Marine
Technical University,
190121, Russian Federation,
St. Petersburg,
st. Lotsmanskaya, 3
e-mail: sbs777@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 29 августа 2024 г.
Received: August 29, 2024.

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-795-804

EFFICIENCY OF INTENSIFICATION OF HEAT REMOVALMENT OF A CLOSED-CIRCUIT MARINE POWER PLANT COOLING SYSTEMS

K. Yu. Fedorovsky, N. K. Grinenko

Sevastopol State university, Sevastopol, Russian Federation

The paper considers a method for increasing the efficiency of closed-loop cooling systems of ship power plants that exclude the consumption of seawater. It is noted that currently widespread open-loop cooling systems that provide for the consumption of seawater are subject to clogging, especially in polluted waters, which can lead to a shutdown of the power plant. Attention is drawn to the fact that, especially when operating a vessel in areas of intensive fishing, significant damage is caused to fish resources, and plankton as the basis of the food chain is intensively destroyed. An intensification of heat removal processes is proposed, which allows reducing the weight and size indicators of closed systems, thereby ensuring their wider implementation in shipbuilding. The objective of the study is to determine the most effective methods of such intensification. Using a ship casing heat exchanger as an example, the possibility of using gas-liquid jets for this purpose was studied. Visual and thermal engineering studies were carried out on models of casing devices. The worst conditions of their operation (heat transfer under free convection) were simulated, when the outside water is motionless relative to the vessel hull. Visual studies showed that the emerging air bubbles have transverse pulsations that destroy the wall boundary layer formed along the heat-transfer surface, which impedes the heat removal process. Thermal engineering studies confirmed a significant (ten times or more) increase in heat transfer. Moreover, this effect increases as the temperature difference between the heat-transfer surface and the outside water decreases. This is important when the vessel is in equatorial waters. This method of process intensification is compared with the case of creating (for example, by means of a pump) a local flow of intake water along the surface of such a heat exchanger. It was determined that the latter is inferior in efficiency to gas-liquid jets. It is concluded that the use of this fairly simple method of intensifying heat removal of closed cooling systems will ensure their wider implementation in shipbuilding practice.

Key words: cooling system, marine power plant, thermal efficiency, gas-liquid jet, heat transfer coefficient.

For citation:

Fedorovsky, Konstantin Yu. and Grinenko Nadezhda K. "Efficiency of intensification of heat removalment of a closed-circuit marine power plant cooling systems" *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechno flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.5 (2024): 795–804. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-795-804.

УДК 629.12

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛОТВОДА ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СУДОВОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ

Федоровский К. Ю., Гриненко Н. К.

Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

В работе рассмотрен метод повышения эффективности замкнутых систем охлаждения судовых энергетических установок, исключающих потребление забортной воды. Отмечается, что широко распространенные в настоящее время разомкнутые системы охлаждения, предусматривающие потребление забортной воды, подвержены засорению, особенно в загрязненной акватории, что может привести к прекращению работы энергоустановки. Обращается внимание на то, что особенно при эксплуатации судна в районах интенсивного рыболовства наносится существенный ущерб рыбным ресурсам, происходит интенсивное уничтожение планктона как основы пищевой цепочки. Предложена интенсификация процессов теплоотвода, позволяющая снизить массогабаритные показатели замкнутых систем, обеспечив тем самым их более широкое внедрение в судостроении. Задачей исследования является определение наиболее эффективных методов такой интенсификации. На примере судового обшивочного теплообменного аппарата исследована возможность использования с этой целью газожидкостных струй. Были проведены визуальные и теплотехнические исследования на моделях обшивочных аппаратов. Выполнено моделирование наихудших условий их работы (теплоотдача при свободной конвекции), когда забортная вода неподвижна

относительно корпуса судна. Визуальные исследования показали, что всплывающие пузырьки воздуха имеют поперечные пульсации, разрушающие пристенный пограничный слой, формирующийся вдоль теплоотдающей поверхности, который препятствует процессу теплоотвода. Теплотехнические исследования подтвердили существенное (в десять и более раз) увеличение теплоотдачи. Причем этот эффект усиливается по мере уменьшения температурного напора между теплоотдающей поверхностью и забортной водой, что очень важно при нахождении судна в экваториальных водах. Данный метод интенсификации процесса сопоставлен со случаем создания (например, посредством насоса) локального течения забортной воды вдоль поверхности такого теплообменника. Определено, что последний уступает по эффективности газожидкостным струям. Сделан вывод о том, что использование этого достаточно простого метода интенсификации теплоотвода замкнутых систем охлаждения обеспечит их более широкое внедрение в практику судостроения.

Ключевые слова: система охлаждения, судовая энергоустановка, тепловая эффективность, газожидкостная струя, коэффициент теплоотдачи.

Для цитирования:

Федоровский К. Ю. Эффективность интенсификации теплоотвода замкнутой системы охлаждения судового энергоустановки / К. Ю. Федоровский, Н. К. Гриненко, В. Б. Чистов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 5. — С. 795–804. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-795-804.

Введение (Introduction)

Широко используемые в настоящее время в судостроении разомкнутые системы охлаждения предусматривают потребление забортной охлаждающей воды [1]. В ряде случаев такие системы имеют недостатки. При эксплуатации судна в сильно загрязненной акватории происходит интенсивное коррозионно-эрозионное разрушение элементов системы, а также возникает угроза ее засорения, что может привести к аварийной ситуации [2]. Кроме того, разомкнутые системы охлаждения оказывают отрицательное экологическое воздействие на рыбные ресурсы. Наибольший отрицательный эффект достигается при эксплуатации судна в районах интенсивного рыболовства. В такие системы вместе с забортной водой попадает планктон и рыбная молодь, которые пройдя через насосы, теплообменники и т. д., практически полностью погибают [3], [4].

Решение данных проблем может быть достигнуто за счет использования замкнутых систем охлаждения, исключающих потребление забортной охлаждающей воды [5], [6]. Возрастает количество оборудованных такими системами судов, регистрируемых Главным управлением Российского морского регистра судоходства.

Целью исследования является разработка методов повышения эффективности замкнутых систем охлаждения для обеспечения условий их более широкого внедрения в практику судостроения.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Оценка эффективности используемого метода интенсификации теплоотвода базировалась на результатах, полученных в ходе экспериментальных теплотехнических исследований. Данные исследования проводились на модели судового обшивочного теплообменного аппарата лабиринтного типа размером 1 × 1 м. Модель размещалась в емкости с неподвижной морской водой объемом около 17 м³. Тем самым моделировался наихудший режим теплоотдачи в забортную воду — свободная конвекция [9]. Модель в нижней своей части имела подвод сжатого воздуха, формирующего газожидкостную струю.

Измерение температуры поверхности теплообменника осуществлялось с использованием 16 хромель-копелевых термопар с диаметром термоэлектродов 0,16 мм. Термопары были размещены равномерно в центрах равных участков, соответственно, площадью 1/16 м². Температура забортной воды также измерялась термопарой. Измерение термо-ЭДС термопар выполнялось компенсационным методом с использованием потенциометра с классом точности 0,05. Измерение расхода воздуха осуществлялось объемным методом, базирующемся на фиксации времени вытеснения воздухом воды из мерной емкости. Относительная погрешность измерений не превышала 10...12 %.

С целью более полного представления механизма интенсификации теплоотвода были проведены визуальные исследования на моделях с прозрачными стенками. В воду были введены специальные добавки, позволяющие при дополнительном освещении наблюдать происходящие процессы. При разработке показателя эффективности данного метода использовались уравнения, полученные на основании применения методов теории подобия тепловых процессов.

Результаты (Results)

Для отвода теплоты в забортную воду могут использоваться различные устройства: бокскулеры, секционные теплообменники (рис. 1) [7], обшивочные теплообменные аппараты (ОТОА) лабиринтного типа [6] и др. Обшивочные теплообменники лабиринтного типа (рис. 2) использованы, в частности, на отечественных самоходных плавкранах грузоподъемностью 500 т пр. 15201, на эксплуатируемых в нашей стране плавкранах «Судоподъем» немецкого производства и др. Нагретая в энергетическом оборудовании пресная вода проходит по лабиринтному каналу, сформированному на внутренней поверхности судовой обшивки, смоченной забортной водой. В результате теплота отводится через судовую обшивку к забортной воде.



Рис. 1. Секционные теплообменники

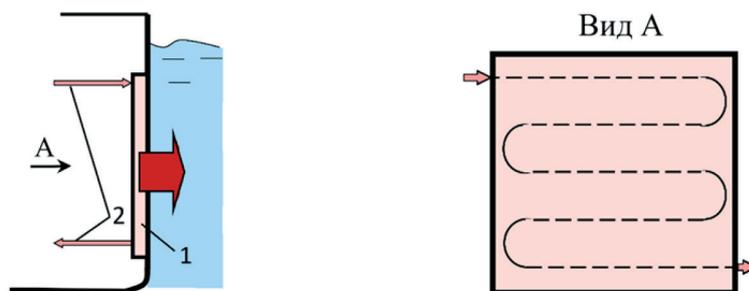


Рис. 2. Судовой обшивочный теплообменный аппарат лабиринтного типа

Среди многочисленных методов повышения эффективности теплоотвода [8] для рассматриваемых аппаратов приемлемым является использование газожидкостных струй. На рис. 3 показана схема, поясняющая применение данного подхода. В районе ОТОА 1 со стороны забортной воды размещается воздушный коллектор 2, через который подается воздух, всплывающие пузырьки из воздушного коллектора формируют газожидкостную струю 4. Причем для этого не требуется воздух высокого давления, поскольку нужно преодолеть лишь высоту столба жидкости, соответствующего глубине погружения коллектора 2 в забортную воду, и сопротивление системы подвода воздуха 3. Необходимо оценить эффективность данного метода повышения эффективности теплоотвода.

Наиболее неблагоприятные условия работы ОТОА и всей системы в целом имеют место в случае, когда судно находится в неподвижной воде, а теплоотдача забортной воде осуществляется

при свободной конвекции [9]. При этом достигается коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}_k$. Данный случай является основным расчетным, поскольку при движении судна обеспечивается теплоотдача при вынужденной конвекции, характеризующаяся существенно большим теплоотводом [10].

Проведенные визуальные исследования в условиях неподвижной забортной воды показали, что при подводе воздуха в нижнюю часть ОТОА вдоль его поверхности формируется газожидкостная струя (рис. 4).

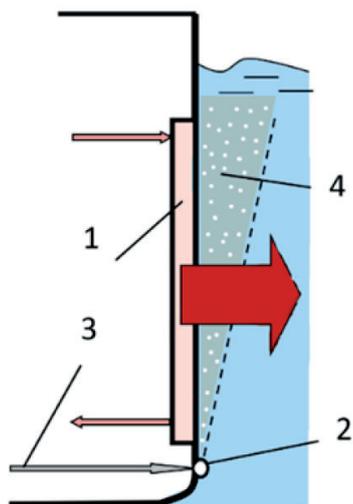


Рис. 3. Схема интенсификации теплоотвода обшивочного теплообменника при стоянке судна: 1 — судовой обшивочный теплообменный аппарат; 2 — воздушный коллектор; 3 — подача воздуха; 4 — газожидкостная струя

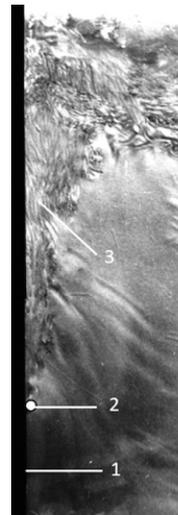


Рис. 4. Визуализация течения газожидкостной струи вдоль теплоотдающей поверхности: 1 — обшивка корпуса судна; 2 — воздушный коллектор; 3 — газожидкостная струя

Поднимающиеся пузырьки воздуха проталкивают жидкость вдоль теплоотдающей поверхности, способствуя улучшению теплоотвода. С целью более детального понимания физики происходящего процесса были выполнены визуальные исследования движения воздушного пузыря со стороны теплоотдающей поверхности (рис. 5).

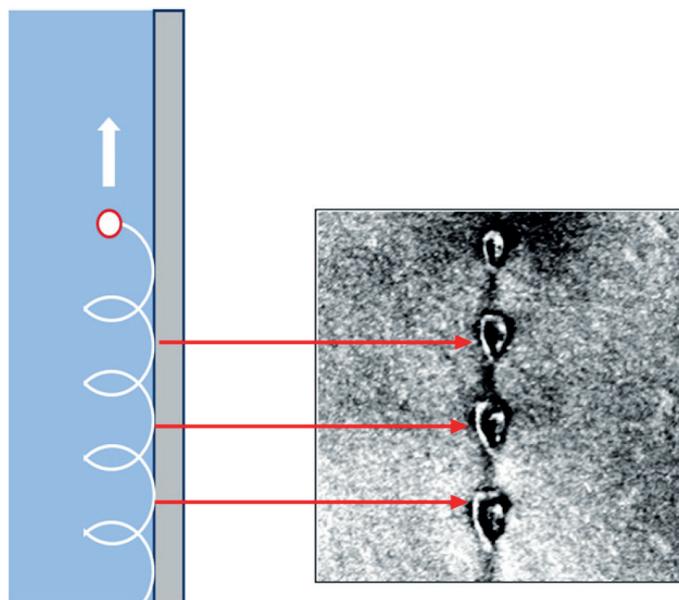


Рис. 5. Визуализация ударов пузырька воздуха о теплоотдающую поверхность

Пузырек воздуха поднимается вверх по спирали, ударяясь при этом о поверхность. На рис. 5 хорошо видны следы таких ударов с шагом, примерно равным 5...7 мм. Известно, что вдоль теплоотдающей поверхности формируется пристенный пограничный слой, препятствующий процессу переноса теплоты от стенки к жидкости и разрушение этого слоя способствует увеличению коэффициента $\bar{\alpha}$. Таким образом, множество пузырьков газожидкостной струи, поднимаясь вдоль поверхности, разрушает пристенный пограничный слой за счет поперечных пульсаций. Это ведет к увеличению $\bar{\alpha}$. На рис. 6 показано относительное изменение коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha} / \bar{\alpha}_k$ в зависимости от линейного расхода воздуха W_r (в диапазоне значений $1,14 \cdot 10^{-4} \dots 1,15 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$) и температурного напора Δt между стенкой и забортной водой.

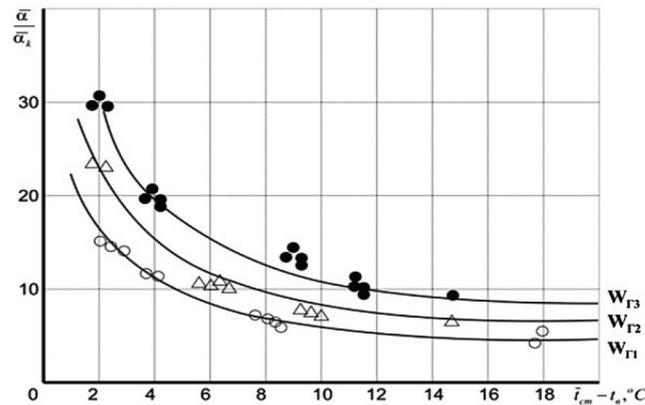


Рис. 6. Сопоставление теплоотдачи газожидкостной струи $\bar{\alpha}$ и теплоотдачи при свободной конвекции $\bar{\alpha}_k$ в зависимости от температурного напора Δt между теплоотдающей поверхностью и забортной водой при различных расходах газа W_r ($W_{r1} < W_{r2} < W_{r3}$)

Хорошо видно, что создание газожидкостной струи является эффективным средством интенсификации теплоотдачи при стоянке судна, поскольку примерно на порядок увеличивается теплоотдача, а при очень малых температурных напорах (судно находится в экваториальных широтах) данное увеличение может достигать 20 раз.

Ранее указывалось, что вынужденная конвекция по сравнению со свободной конвекцией (неподвижная забортная вода) характеризуется большими значениями коэффициента теплоотдачи. В принципе, в районе ОТОА можно было бы разместить специальное устройство, проталкивающее воду вдоль теплоотдающей поверхности, обеспечивая условия вынужденной конвекции. Поэтому целесообразно сопоставить эффективность газожидкостных струй с указанным случаем. Для оценки энергетической эффективности могут быть использованы различные подходы [11]. В данном случае целесообразно воспользоваться широко известным в теплотехнике безразмерным показателем (критерием Кирпичева):

$$П = \frac{Q}{N},$$

где Q — отводимый тепловой поток, Вт;

N — затраты мощности, Вт.

Причем чем выше значение $П$, тем более эффективным является процесс.

Для некоторой заданной поверхности высотой H и длиной L в общем случае можно записать:

$$Q = \bar{\alpha} \Delta t HL ;$$

$$\Delta t = \bar{t}_c - t_3,$$

где $\bar{\alpha}$ — среднее по поверхности значение коэффициента теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

\bar{t}_c — средняя температура поверхности стенки, °С;

t_3 — температура забортной воды, °С.

В случае, если вдоль поверхности создается газожидкостная струя, то затраты мощности на это могут быть найдены из соотношения

$$N = \gamma h_0 W_{r_0},$$

где h_0 — глубина на которой подается сжатый воздух, м;

W_{r_0} — расход воздуха, м³/с;

γ — удельный вес забортной воды, Н/м³.

С учетом этого показатель примет вид

$$\Pi = \frac{\bar{\alpha}_r \Delta t H L}{\gamma h_0 W_{r_0}} = \frac{\bar{\alpha}_r \Delta t H L}{\gamma h_0 W_{r_{L_0}}}, \quad (1)$$

где $W_{r_{L_0}} = \frac{W_{r_0}}{L}$, м²/с.

Поскольку соответствующее Δt изменение Q не связано с показателем эффективности, разделим правую и левую части выражения (1) на Δt . Тогда Π^* , К⁻¹:

$$\Pi^* = \frac{\Pi}{\Delta t} = \frac{\bar{\alpha}_r H}{\gamma h_0 W_{r_{L_0}}}.$$

Рассмотрим взаимосвязь показателя Π^* с затратами мощности N (рис. 7), Увеличение N приводит к снижению Π^* , вследствие уменьшения темпа прироста $\bar{\alpha}_r$ по мере увеличения $W_{r_{L_0}}$. Нет необходимости увеличивать беспрестанно $W_{r_{L_0}}$. Достаточным является обеспечение условия $W_{r_{L_0}} = (0,6 \dots 0,8) \cdot 10^{-3}$ м²/с, что соответствует на рис. 4 диапазону $N \leq 30 \dots 40$ Вт. Из графика также видно, что при заданных h_0 и N повышению Π^* способствует увеличение H поверхности. Газожидкостная струя, на создание которой затрачена энергия, поднимается вверх, обеспечивая улучшение теплоотдачи по всей высоте H .

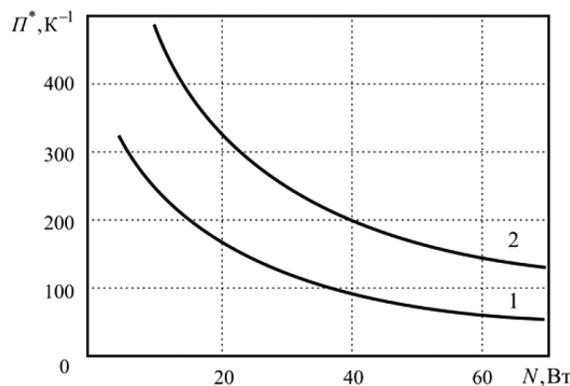


Рис. 7. Зависимость показателя Π^* от затраченной мощности N на создание газожидкостной струи ($h_0 = 5$ м, $L = 1$ м, $t_3 = 20$ °С, $W_{r_{L_0}} = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м²/с):
1 — $H = 1$ м; 2 — $H = 2$ м

Одна и та же поверхность F может быть скомпонована с различным сочетанием H и L . Из предыдущих рассуждений следует, что соотношение этих величин должно сказываться на Π^* . Как видно из рис. 8, для поверхности заданной площади при фиксированном расходе подаваемого газа W_{r_0} . Увеличение H с 1 м до 8 м позволяет повысить Π^* со 160 до 330 К⁻¹, т. е. в два раза. Увеличение H и происходящее при этом уменьшение L приводит к росту $W_{r_{L_0}}$ и $\bar{\alpha}_r$. Для указанных зна-

чений H наблюдается повышение $\bar{\alpha}_r$ с 2000 Вт/(м²·К) до 4100 Вт/(м²·К). Таким образом, при использовании газожидкостных струй предпочтительной является компоновка теплообменных поверхностей с максимальным отношением H/L .

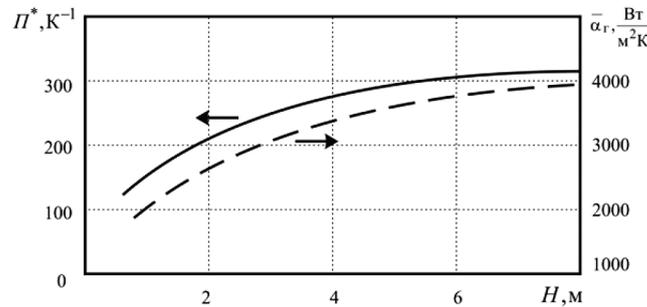


Рис. 8. Зависимость показателя Π^* и $\bar{\alpha}_r$ от высоты поверхности H при создании газожидкостной струи ($F = 4 \text{ м}^2$, $W_{г_0} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$, $h_0 = 10 \text{ м}$)

Сопоставим показатели Π^* , получаемые в случае использования предложенного метода интенсификации теплоотдачи и в случае обтекания плоской поверхности потоком однородной жидкости. Последнее может быть обеспечено за счет установки специальных устройств, проталкивающих жидкость вдоль наружной поверхности ОТОА. Выделим на корпусе судна теплоотдающую поверхность и условно рассмотрим ее как одиночную пластину, обтекаемую потоком однородной жидкости. Теплоотдача описывается известной зависимостью

$$\bar{\alpha}_j = \frac{\lambda_j}{L} 0,037 \text{Re}_L^{0,8} \text{Pr}_j^{0,43}.$$

Затраты мощности на движение жидкости вдоль поверхности размерами HL :

$$N = S_c v = C_f \frac{\rho_j v^2}{2} HL v,$$

где v — скорость движения жидкости, м/с;

$$\frac{C_f}{8} = 0,037 \text{Re}_L^{-0,2},$$

где Re — число Рейнольдса.

$$\text{Re} = (vL) / \zeta_j,$$

где ζ — коэффициент кинематической вязкости жидкости, м²/с².

После соответствующей подстановки и преобразований получим

$$\Pi^* = \frac{\lambda_j \text{Pr}_j^{0,43}}{4 \rho_j \zeta_j v^2},$$

где Pr — число Прандтля.

Полученный показатель Π^* позволяет сопоставить эффективность повышения теплоотода при использовании газожидкостной струи с эффективностью, достигаемой в результате проталкивания однородной жидкости (заборной воды) вдоль теплоотдающей поверхности.

Обсуждение (Discussion)

На рис. 9 показано изменение рассматриваемого показателя в случае использования газожидкостной струи и при обтекании поверхности однородной жидкостью. Предложенный метод интенсификации теплоотдачи обеспечивает большее значение Π^* примерно в 1,25 раз.

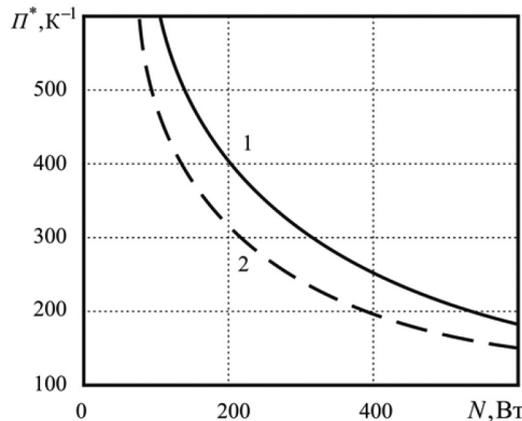


Рис. 9. Изменение P^* в зависимости от затрачиваемой мощности N ($F = 5 \times 5$ м, $t_3 = 20$ °С, $h_0 = 10$ м):
1 — применена газожидкостная струя;
2 — обтекание пластины однородной жидкостью

Ранее отмечалось, что для газожидкостной струи P^* зависит от размеров поверхности (в первую очередь от H). При обтекании поверхности однородной жидкостью значение N также зависит от этих размеров. Поэтому целесообразно рассмотреть влияние размеров поверхности на P^* (рис. 10). В области $H > 1,5$ м рассматриваемый метод интенсификации теплоотдачи обеспечивает более высокие P^* . При $H = 10$ м значения отличаются почти в полтора раза. В случае $H \approx 1,5$ м значения показателей сравниваются, а при $H < 1,5$ м значение P^* для рассматриваемого метода уменьшается. Объясняется это тем обстоятельством, что при фиксированном F уменьшение H ведет к увеличению L . Поскольку суммарное количество подаваемого газа $W_{г0}$ постоянно ($N = \text{const}$), $W_{г0}$ также уменьшается, что существенно снижает $\bar{\alpha}_r H$. Таким образом, еще раз подтверждается необходимость компоновки поверхности теплообмена из условия получения максимальных H/L .

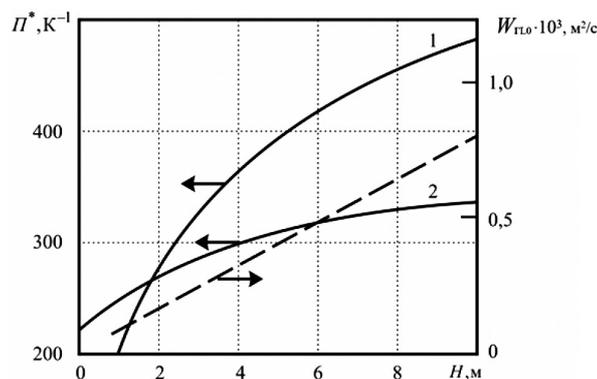


Рис. 10. Зависимость показателя эффективности P^* и величины $W_{г0}$, т, высоты поверхности теплообмена ($h_0 = 10$ м; $F = 25$ м; $N = 200$ Вт; $t_3 = 20$ °С):
1 — применена газожидкостная струя;
2 — обтекание поверхности однородной жидкостью

Газожидкостные струи являются надежным средством повышения эффективности теплоотвода, особенно при стоянке судна, когда забортная вода неподвижна. Такие струи не только проталкивают жидкость вдоль теплоотдающей поверхности, но и являются эффективным средством разрушения пристенного пограничного слоя, оказывающего негативное влияние на теплоотвод. Это касается плоской поверхности, однако аналогичные проблемы характерны и для теплообменных

поверхностей, например, рассмотренных секционных теплообменников. Поэтому использование данного метода будет для них эффективным.

Выводы (Summary)

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Использование газожидкостных струй является эффективным средством интенсификация процесса теплоотдачи неподвижной забортной воде. Данный метод позволяет существенно увеличить теплоотвод замкнутой системы охлаждения, причем наибольший эффект достигается при малых температурных напорах, соответствующих на практике нахождению судна в акватории с высокой температурой забортной воды.

2. Газожидкостная интенсификация процесса обеспечивает большую эффективность по сравнению с обеспечением вынужденной конвекции, что объясняется выявленным в ходе исследований разрушением пристенного пограничного слоя, препятствующего теплоотводу.

3. Важным преимуществом данного метода является то, что для создания газожидкостных струй не нужен воздух высокого давления и может использоваться оборудование, широко применяемое в судовой практике.

4. Данный метод интенсификации теплоотвода может быть успешно использован для замкнутых систем охлаждения, использующих для отвода теплоты бокскуллеры, секционные забортные теплообменники и др.

5. Реализация данного метода интенсификации теплоотдачи позволяет существенно снизить требуемые площади ОТОА, а соответственно, и массогабаритные показатели ЭСО, способствуя их более широкому внедрению в практику судостроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихонов Н. Ф. Анализ существующих систем охлаждения судовых дизелей / Н. Ф. Тихонов // Тенденции развития науки и образования. — 2023. — № 102–5. — С. 151–154. — DOI: 10.18411/trnio-10-2023-284. — EDN MUXXCM.

2. Харламова А. Э. Анализ аварийности судов, вызванной ненадежной работой системы охлаждения судовых энергетических установок / А. Э. Харламова, М. Н. Покусаев, А. В. Трифонов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2023. — № 2. — С. 30–40. DOI: 10.24143/2073-1574-2023-2-30-40. — EDN QCWWRO.

3. Федоровский К. Ю. Механизм отрицательного антропогенного воздействия систем охлаждения СЭУ / К. Ю. Федоровский, Н. К. Федоровская, В. В. Ениватов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12, № 6. — С. 1068–1077. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1068-1077 — EDN UZNMHI.

4. How power plants kill fish&damage our water ways. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://blogs.sierraclub.org/compass/2011/08/how-power-plants-kill-fish-damage-our-waterways-.html> (дата обращения 11.11.2021).

5. Федоровский К. Ю. Замкнутые системы охлаждения судовых энергетических установок. / К. Ю. Федоровский, Н. К. Федоровская — М.: ИНФРА-М, 2017. — 163 с.

6. Федоровский К. Ю. Замкнутые системы охлаждения судовых энергоустановок с теплоотводом через судовую обшивку / К. Ю. Федоровский, Н. К. Гриненко // Научные проблемы водного транспорта. — 2022. — № 70. — С. 87–97. DOI:10.37890/jwt.vi70.238. — EDN SDURGK.

7. Specialty Gridcooler Keel Coolers [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.fernstrum.com/products/gridcooler-keel-cooler/specialty-coolers/> (дата обращения 21.12.2021).

8. Шаповалов А. В. Способы интенсификации теплообмена в теплопередающих устройствах / А. В. Шаповалов, Н. М. Кидун, Т. Н. Никулина // Вестник гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. — 2021. — № 4(87). — С. 67–76. — EDN OVNHCG.

9. Кузеванов В. С. Тепломассообмен. / В. С. Кузеванов, Г. С. Закожурникова, С. С. Закожурников. — М.: Юрайт, 2024. — 193с.

10. Барышева О. Б. Тепломассообмен в теории и на практике / О. Б. Барышева, Е. В. Варсегова. — Казань: Бук, 2021. — 234 с. — EDN AOQWST.

11. Калашников А. М. Классификация и сравнительная оценка методов повышения эффективности теплообменников для системы рекуперации тепловых потерь технологического оборудования / А. М. Калашников // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2021. — № 6. — С. 237–244. DOI:10.24412/2071-6168-2021-6-237-244. — EDN NRSUGO.

REFERENCES

1. Tikhonov N. F. “Analiz sushchestvuyushchih sistem ohlazhdeniya sudovyh dizelej.” *Tendencii razvitiya nauki i obrazovaniya* 102–5 (2023): 151–154. DOI: 10.18411/trnio-10-2023-284.
2. Kharlamova A. E., Pokusaev M. N., Trifonov A. V. Analiz avarijnosti sudov, vyzvannoj nenadezhnoj rabotoj sistemy ohlazhdeniya sudovyh energeticheskikh ustanovok Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya 2 (2023): 30–40.
3. Fedorovsky K. Yu., Fedorovskaya N. K., Yenivatov V. V. Mekhanizm otricatel'nogo antropogennogo vozdeystviya sistem ohlazhdeniya SEU Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova 12.6 (2020) 1068–1077. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1068-1077.
4. How power plants kill fish&damage our waterways. Web. 11 Nov 2020 <<https://blogs.sierraclub.org/compass/2011/08/how-power-plants-kill-fish-damage-our-waterways-.html>>.
5. Fedorovsky K. Yu. and Fedorovskaya N. K. *Closed cooling systems of ship power plants*. M.: INFRA-M, 2017.
6. Fedorovsky K. Yu. and Grinenko N. K. “Zamknutyje sistemy ohlazhdeniya sudovyh energoustanovok s teplootvodom cherez sudovuyu obshivku.” *Nauchnye problemy vodnogo transporta* 70 (2022): 87–97.
7. Specialty Gridcooler Keel Coolers Web. 21 Dec. 2021 <<http://www.fernstrum.com/products/gridcooler-keel-cooler/specialty-coolers/>>.
8. Shapovalov A. V., Kidun N. M. and Nikulina T. N. “Sposoby intensivifikacii teploobmena v teploperedayushchih ustrojstvah” Vestnik gorn'jskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P. O. Suhogo 4 (87) (2021): 67–76.
10. Barysheva O. B. and Varsegova E. V. *Teplomassoobmen v teorii i na praktike*. Kazan: Buk, 2021.
11. Kalashnikov A. M. “Klassifikaciya i sravnitel'naya ocenka metodov povysheniya effektivnosti teploobmennikov dlya sistemy rekuperacii teplovyh poter' tekhnologicheskogo oborudovaniya” *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* 6 (2021): 237–244. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-6-237-244.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Федоровский Константин Юрьевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Энергоустановки морских судов и сооружений», Севастопольский государственный университет, 299053, Россия, ул. Университетская, 33, г. Севастополь
e-mail: fedkonst@rambler.ru

Гриненко Надежда Константиновна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергоустановки морских судов и сооружений», Севастопольский государственный университет, 299053, Россия, ул. Университетская, 33, г. Севастополь
e-mail: nkgrinenko@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Fedorovskiy Konstantin Yu. — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Power Installations of Marine Vessels and Structures, Sevastopol State University, 299053, Russia, Universitetskaya 33st., Sevastopol
e-mail: fedkonst@rambler.ru

Grinenko Nadezhda K. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Plants of Sea Vessels and Structures, Sevastopol State University, 299053, Russia, st. Universitetskaya 33, Sevastopol
e-mail: nkgrinenko@mail.ru

Статья поступила в редакцию 5 сентября 2024 г.

Received: September 5, 2024.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-805-816

DEVELOPMENT OF AUTOMATION AND CONTROL SOFTWARE FOR CHARGING SYSTEMS OF MULTIROTOR SMALL UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS FOR TASKS OF CARGO SEAPORTS

E. A. Voznesensky¹, N. N. Maiorov¹, A. N. Terekhov²

¹ Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, Russian Federation

² Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russian Federation

The topic of the research is the consideration of the solution of the actual problem of extending the flight mission time of unmanned transport systems of multirotor type with the help of automated charging systems and automation subroutines, which is currently one of the demanded in the field of development and pilot implementations. The paper considers the situation of using an unmanned aircraft system to perform autonomous flights between cargo port areas, for example, to collect data for building digital spatial models or to transfer a certain type of cargo. It is noted that due to the considerable size and remoteness of cargo terminals from each other it is necessary to place a network of automated charging stations. The efficiency of autonomous flights is substantiated and a new model of flight assignment of an unmanned aircraft system is given for solving the routing problem, taking into account the location of charging station sites, for example, in cargo port areas. To solve the set tasks, a new hardware system for charging unmanned aerial systems considering a receiver module with a coil on board and a ground landing system for charging is considered, circuit diagrams are given and constraints for performing the battery charging process are specified. The fragments of programme codes of automation of the graphical interface of the web-server with display of all parameters and calculation of the coefficient of efficiency at charging are resulted. The choice of Arduino IDE software environment is justified. The possibility of using the developed automated station for battery charging for a large class of drones of multirotor type is noted. On the basis of a series of experiments in the flight research field of the laboratory of unmanned aircraft systems of the SUAI, it is established that the charging station together with the receiving module managed to achieve the efficiency of charge transfer at the level of 73.7%. The obtained values of efficiency allow to draw a conclusion about the possibility of practical use for real transport tasks and the possibility of network deployment, in particular, on the dedicated specialised areas of the cargo port. The developed automation subprogramme for the deployment of a network of charging stations (e. g. in different areas of the port) allows to create an information system for monitoring the operation of charging stations, which significantly increases the controllability and reliability of the system.

Keywords: seaport, automation program, unmanned transportation system, battery charging, routing, cargo delivery, automation and control, aerial logistics, multi-rotor systems, route networks.

For citation:

Voznesensky, Evgeniy A., Nikolai N. Maiorov, and Andrey N. Terekhov “Development of automation and control software for charging systems of multirotor small unmanned aircraft systems for tasks of cargo seaports” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 16.5 (2024): 805–816. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-805-816.

УДК 681.5, 519.2, 658.5

РАЗРАБОТКА ПОДПРОГРАММЫ АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ЗАРЯДКИ МУЛЬТИРОТОРНЫХ МАЛЫХ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ЗАДАЧ МОРСКИХ ГРУЗОВЫХ ПОРТОВ

Е. А. Вознесенский¹, Н. Н. Майоров¹, А. Н. Терехов²

¹ ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения», Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Темой исследования является рассмотрение решения актуальной задачи продления времени выполнения полетных заданий беспилотных транспортных систем мультироторного типа с помощью автоматизированных систем зарядки и подпрограммы автоматизации, которая в настоящее время является одной из востребованных в сфере разработок и пилотных внедрений. В статье рассмотрена ситуация применения беспилотной авиационной системы для выполнения автономных полетов между районом грузового порта, например, для сбора данных для построения цифровых пространственных моделей или для передачи определенного типа грузов. Отмечается, что ввиду значительных размеров и удаленности грузовых терминалов друг от друга необходимо размещение сети автоматизированных зарядных станций. Дано обоснование эффективности выполнения автономных полетов и для решения задачи маршрутизации приведена новая модель полетного задания беспилотной авиационной системы с учетом размещения мест зарядных станций, например, в районах грузового порта. Для решения поставленных задач рассмотрен новый аппаратный комплекс для зарядки беспилотных авиационных систем с учетом приемного модуля с катушкой на борту и наземной системой посадки для зарядки, приведены принципиальные схемы и указаны ограничения для выполнения процесса заряда аккумуляторов. Приведены фрагменты программных кодов автоматизации графического интерфейса веб-сервера с отображением всех параметров и расчетом коэффициента полезного действия при зарядке. Обоснован выбор программной среды Arduino IDE. Отмечается возможность использования разработанной автоматизированной станции для заряда аккумуляторов для большого класса беспилотников мультироторного типа. На основе серии экспериментов в летном исследовательском поле лаборатории беспилотных авиационных систем ФГАО ВО ГУАП установлено, что зарядной станции вместе с приемным модулем удалось достигнуть КПД по передаче заряда на уровне 73,7 %. Полученные значения КПД позволяют сделать вывод о возможности ее практического использования для реальных транспортных задач и возможности развертывания сети, в частности, на выделенных специализированных участках грузового порта. Разработанная подпрограмма автоматизации при развертывании сети зарядных станций (например, в разных районах порта) позволяет создать информационную систему мониторинга работы зарядных станций, что значительно повышает управляемость и надежность системы.

Ключевые слова: морской порт, подпрограмма автоматизации, беспилотная транспортная система, заряд аккумулятора, маршрутизация, доставка грузов, автоматизация и управление, аэрологистика, мультироторные системы, маршрутные сети.

Для цитирования:

Вознесенский Е. А. Разработка подпрограммы автоматизации и управления для систем зарядки мультироторных малых беспилотных авиационных систем для задач морских грузовых портов / Е. А. Вознесенский, Н. Н. Майоров, А. Н. Терехов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 5. — С. 805–816. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-805-816.

Введение (Introduction)

Беспилотные транспортные системы в настоящее время определяют новую область научных исследований, опытных разработок, успешных пилотных внедрений, которые можно масштабировать для промышленных, транспортных сфер [1]–[3]. Особое внимание уделяется области беспилотных авиационных систем (БАС), в частности развитию нового направления «аэрологистика» [3], [4]. Исследования в данной области направлены на нахождение решений применения БАС в целях перевозки грузов, обеспечения взаимодействия транспортных компаний, клиентов в регионах, формирования новых систем доставки грузов за счет построения новых моделей маршрутных транспортных сетей. Актуальной сферой новых разработок является применение беспилотных авиационных систем для морских грузовых портов и терминалов. Можно рассматривать вопрос обеспечения взаимодействия отдельных терминалов, например, в морском грузовом порту. Сегодня в Российской Федерации запущены масштабные преобразования в сфере БАС, которые представлены в Распоряжении Правительства Российской Федерации от 21 июня 2023 г. № 1630-р «Стратегия развития беспилотной авиации Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года» и Национальном проекте «Беспилотные авиационные системы» [5]. Среди основных пяти федеральных проектов с позиций новых исследований и разработок можно выделить «Фундаментальные и перспективные исследования в сфере БАС» и «Развитие инфраструктуры, обеспечение безопасности и формирование

специализированной системы сертификации БАС». Особое внимание в данных направлениях уделяется организации серийного производства нового вида средств наземного обслуживания, в том числе стартовых и посадочных средств, включая пусковые установки, парашюты, аэрофинишеры, в том числе тренажеры и их программно-аппаратное обеспечение для подготовки экипажа и обслуживающего персонала с учетом средств транспортирования и жизнеобеспечения, вспомогательных средств, включая аппаратуру и оборудование для пред- и послеполетного контроля БАС, а также для хранения средств комплекса. Одним из наиболее важных средств для поддержания и увеличения времени автономности, а также выполнения полетных заданий являются наземные комплексы автоматизированной системы зарядки батарей мультироторных беспилотных летательных аппаратов. Среди различных видов мультироторных систем [1] востребованы новые решения для малых беспилотных летательных аппаратов ввиду их применения для достаточно большого класса задач производственных процессов, логистических процессов, обеспечения задач внутрипроизводственной логистики и идентификации процессов.

Использование беспилотной авиационной системы в морском порту позволит повысить качество выполнения безопасности судоходства, когда судно в режиме реального времени передает информацию о процессе выполнения швартовки. При создании специализированной инфраструктуры для беспилотных авиационных систем можно сформировать ситуационный центр по представлению динамических данных о работе причалов. Таким образом, разработка в порту инфраструктуры для зарядных станций также является крайне актуальной задачей.

Актуальность темы исследования подтверждается многочисленными результатами выполнения модельных сценариев доставки грузов беспилотными авиационными системами мультироторного типа [6]–[8], когда для выполнения задания автономного полета не хватает базовой зарядки аккумулятора в точке старта. Поэтому широкое использование БАС ограничивается необходимостью зарядки и дозарядки аккумуляторных батарей непосредственно на объекте работ. Проблемой применения БАС является сравнительно небольшое время полета, в среднем составляющее до 20 мин, которое ограничено емкостью аккумуляторной батареи. Установка более мощных аккумуляторов позволяет увеличить время полета, но вследствие большего размера и большей массы аккумулятора, по сравнению с базовым [9], оказывает влияние на аэродинамические свойства и стабильность в полете. Очевидно, проблему можно решить совершенствуя эффективность применяемых аккумуляторов, используя двигатели внутреннего сгорания для мультироторных систем или гибридные схемы. Однако наиболее перспективным решением является использование мобильной системы зарядки мультироторных беспилотных авиационных систем.

Для достижения целей увеличения времени автономного полета мультироторных систем необходимо решение комплекса таких вопросов, как исследование аппаратного обеспечения зарядной станции, выбор моделей квадрокоптеров, для которых применима конструкция зарядной станции, разработка подпрограмм автоматизации и управления системы зарядки, позволяющая отображать как индикацию состояния заряда, так и дополнительную техническую информацию.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Существует несколько вариантов реализации зарядных станций, при этом укрупненно они могут быть разделены на следующие группы: двухконтактный, одноконтактный, бесконтактный, а также двухполюсная схема подключения с помощью матрицы контактных площадок. Обеспечение мобильности использования и расположения может быть достигнуто при помощи использования бесконтактной зарядной станции. Кроме того, имеют место такие гибридные варианты зарядных станций, как лазерная зарядка БАС во время полета, создание «летающей батареи», беспроводная зарядка дронов в полете, дронопорт (станция с механизированной заменой аккумулятора), наземная станция беспроводной зарядки дрона (для морских систем — станция базирования на судне или причале беспроводной зарядки дрона).

С практической точки зрения режим пилотирования беспилотной авиационной системой в ручном режиме выполняется во время заряда аккумулятора. Оператор планирует маршрут либо с учетом возврата беспилотной авиационной системы в точку старта, либо с учетом замены аккумулятора в следующей точке для выполнения возвратного маршрута. В работе [10] приведено программное обеспечение, позволяющее оценить выполнимость полетного маршрута на основе ввода реальных данных по состоянию аккумулятора и оценки массы груза, который необходимо доставить (рис. 1).

Доставка дроном: Максимальный вес груза

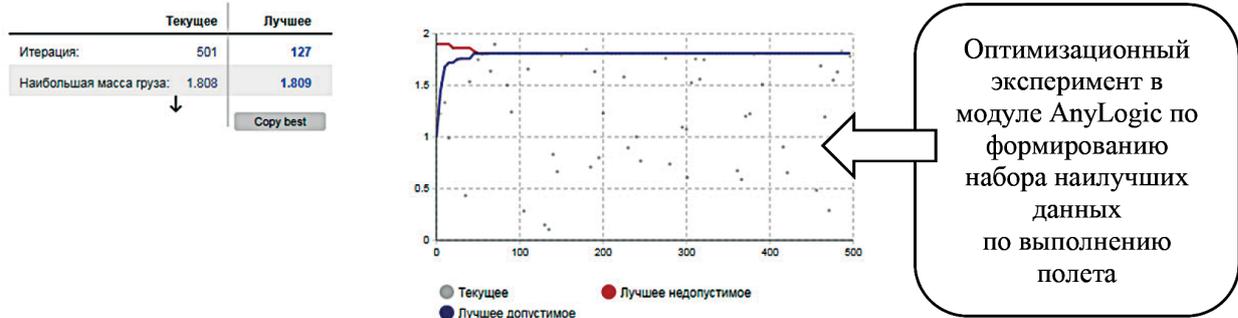


Рис. 1. Прогнозирование выполнения полета беспилотной авиационной системой на основе оценки массы груза и данных о состоянии аккумулятора

Наиболее востребованными являются полетные задания, выполняемые автономно на основе автоматизированных полетных заданий. В табл. 1 приведены уровни автономности беспилотных авиационных систем и автоматизированное программное обеспечение.

Таблица 1

Уровни автономии беспилотных систем для транспортных задач

Уровень автономии	0	1	2	3	4	5
Степень автоматизации	Без автоматизации (ручной режим)	Слабая автоматизация	Частичная автоматизация	Условная автоматизация	Высокая автоматизация	Полная автоматизация
Описание уровня	Ручное управление полетом	Пилот контролирует процесс полета. БАС передает один параметр во время полета	Пилот, остался ответственным за подготовку полета и эксплуатацию. Дрон контролирует направление и высоту при определенных условиях	Оператор действует как резервная система. Беспилотник может выполнять все функции при определенных условиях выполнения полета	Оператор вне системы. У беспилотной авиационной системы есть резервные системы, позволяющие выполнять полет при возникновении ситуаций	Беспилотная система использует элементы ИИ для обработки полетных данных и корректировки выполнения полета системами на борту

На основе анализа табл. 1 видно, что для того, чтобы повысить степень автономности беспилотных авиационных систем мультироторного типа, необходимо создать инфраструктуру, т. е. внедрить такую аппаратную систему с информационным обеспечением, которая может автоматизировать процессы, связанные с зарядом бортового аккумулятора.

Модель маршрутизации выполнения автономных полетов беспилотной авиационной системой для выполнения автономных полетов между районами морского грузового порта или другого порта [11], [12] приведена на рис. 2.

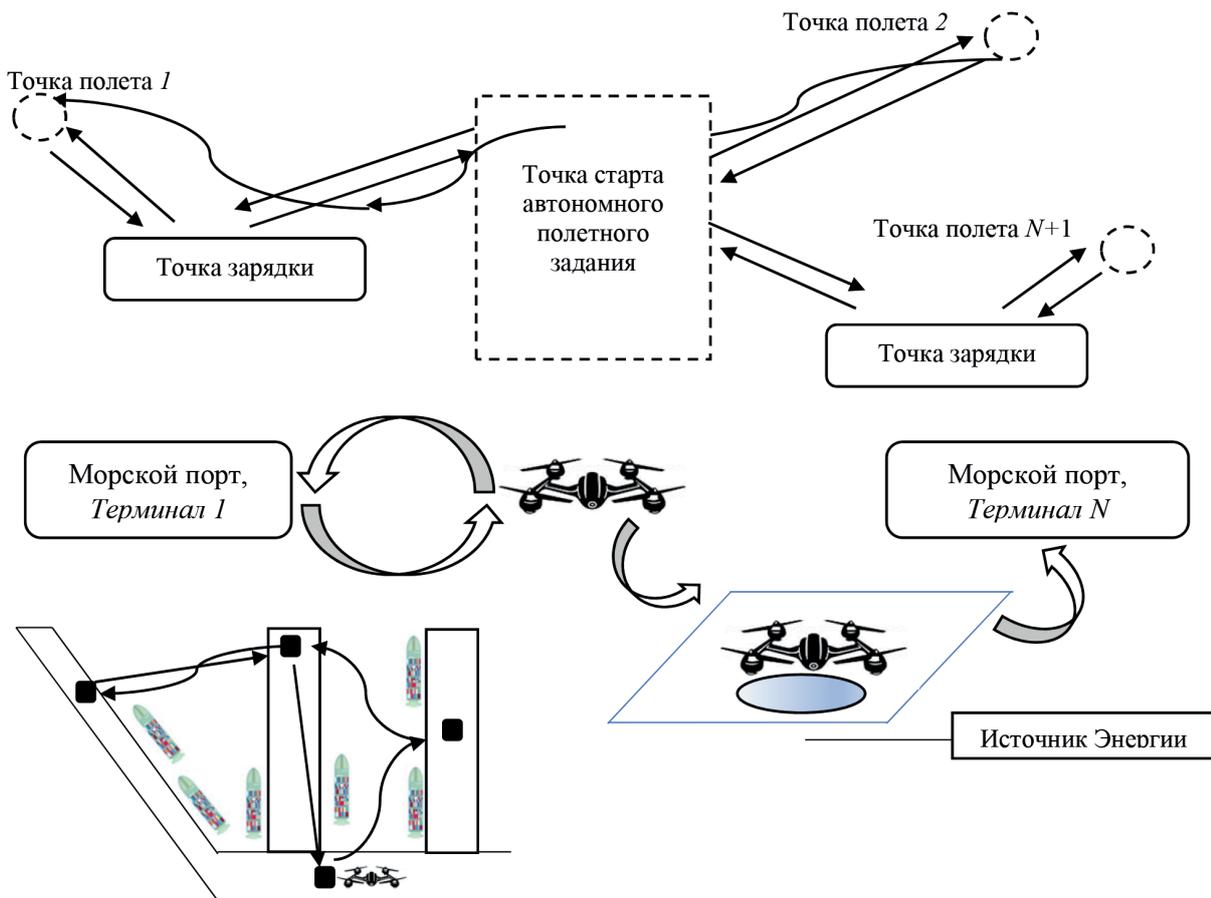


Рис. 2. Модель полетного задания беспилотной авиационной системы при выполнении полетов между районами морского порта с размещением автоматизированных систем зарядки БАС в терминалах

Для увеличения автономности и обеспечения мобильности заряда БАС предлагается использование беспроводной передачи энергии. Для решения задачи автоматической зарядки бортовой аккумуляторной батареи, а также для повышения универсальности применения решения была использована схема с беспроводной передачей энергии, содержащая *приемный модуль*, устанавливаемый на беспилотную систему мультироторного типа, который подключается параллельно бортовой сети, и *передающий модуль*, который отвечает за беспроводную передачу энергии и выполняет передачу данных о статусе зарядки аккумуляторной батареи в центр управления полетами. Основная особенность беспроводной системы зарядки аккумуляторной батареи заключается в относительно небольшом размере как приемной, так и передающей части, отсутствии необходимости выполнения точной посадки с точностью до 1 см с дальнейшей ориентацией дрона на платформе, а также в том, что приемную часть можно установить на различные модели беспилотных систем, тем самым обеспечив применимость для большого класса моделей. Для решения поставленной задачи был разработан аппаратный комплекс для бесконтактной зарядки беспилотной авиационной системы и подпрограммы автоматизации для отображения процесса заряда и управления.

Результаты исследования (Results of the Research)

Для реализации прототипа беспроводной передачи энергии посредством технологии магнитно-резонансной индукции была разработана принципиальная электрическая схема трансмиттера и ресивера. Приемная часть зарядной станции беспилотной системы мультироторного типа состоит из приемной катушки индуктивности, диодного моста, DC–DC преобразователя напряжения, платы управления на базе микроконтроллера ESP8266 [13], а также электролитических

и пленочных конденсаторов. На рис. 3 приведена принципиальная схема подключения электронных компонентов зарядной станции.

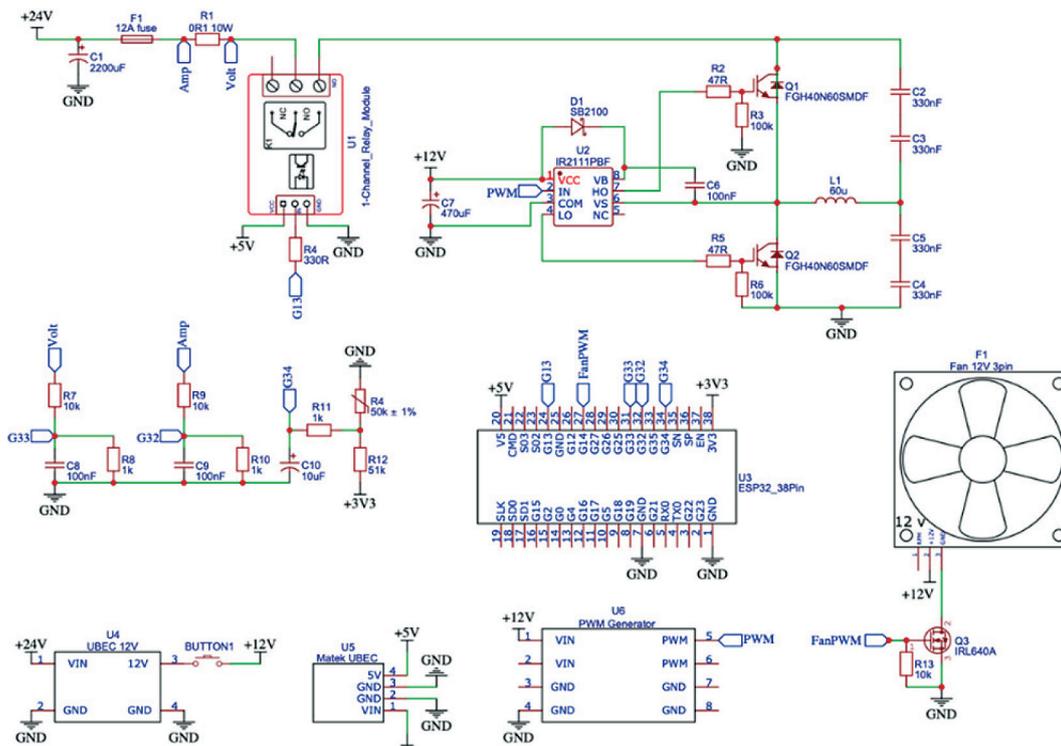


Рис. 3. Принципиальная схема подключения электронных компонентов передающей части зарядной станции для беспилотных авиационных систем

Напряжение модуля настроено на 17,1 В. Это значение подобрано экспериментально. Так, на нагрузку (4S аккумулятор) должно приходиться 16,8 В. Напряжение 17,1 В зафиксировано с учетом падения напряжения под нагрузкой на выходе модуля. В представленной принципиальной схеме (см. рис. 3) установлена BMS плата ($U3$), рассчитанная под литий-ионные или литий-полимерные аккумуляторы конфигурации 4S. Плата BMS выполняет балансировку заряда ячеек, защищая аккумулятор от короткого замыкания, перегрузки по току, перезаряда, переразряда, т. е. слишком высокого и низкого напряжения каждой ячейки. На основе выбранных параметров можно достигнуть заряда аккумуляторов для большого класса и модификаций беспилотных авиационных систем.

Аппаратная реализация автоматизированной системы зарядки, сборка и настройка (рис. 4) производились в лаборатории беспилотных авиационных систем инженерной школы и лаборатории интеллектуальной транспортной инфраструктуры кафедры системного анализа и логистики ФГАОУ ВО ГУАП для беспилотных авиационных систем.



Рис. 4. Итоговая аппаратная сборка комплекса для зарядки беспилотных авиационных систем с учетом приемного модуля с катушкой на борту, наземной системой посадки и зарядки

Для мониторинга и управления системы был реализован веб-сервер в локальной сети, который позволяет включать / выключать зарядную станцию, производить мониторинг температуры, напряжения и силы тока как на трансмиттере, так и на ресивере. В программный код включена часть для вычисления КПД в процентах. Программной средой для реализации выбрана Arduino IDE [14] под ESP32. Программа реализована как клиент и сервер, между которыми производится передача пакетов. При программной реализации серверная часть решает следующие задачи:

1. Создает вайфай точку (Wi-Fi), создает веб-сервер для мониторинга и управления станцией.
2. Принимает данные (показания датчиков) с esp12 дрона по протоколу esp-now, проверяет наличие соединения с клиентом.
3. Проверяет подключение датчиков тока, напряжения и температуры.
4. «Сглаживает» значения датчиков с помощью экспоненциального фильтра.
5. Осуществляет управление входным реле в случае пользовательского включения / выключения системы, а также отключает систему до перезагрузки в случае срабатывания одной из защит (по току, напряжению, температуре).
6. Автоматически управляет оборотами вентилятора в зависимости от температуры транзисторов.

В процессе программной реализации клиентская часть решает следующие задачи:

1. Автоматически подключается по протоколу esp-now к серверной части.
2. Отправляет данные (показания датчиков) на esp12 станции по протоколу esp-now.
3. Проверяет подключение датчиков тока, напряжения и температуры.
4. «Сглаживает» значения датчиков с помощью экспоненциального фильтра.

Приведем фрагмент программного кода в среде Arduino IDE под ESP32 на стороне сервера [15], [16]. Функция switchAction () управляет входным реле в случае пользовательского включения / выключения системы, а также отключает систему до перезагрузки в случае срабатывания одной из защит (по току, напряжению, температуре):

```
void switchAction(Control* sender, int value) {  
    if (!systemProtection) {  
        switch (value) {  
            case S_ACTIVE:  
                // Serial.print("Active:");  
                digitalWrite(relayPin, HIGH);  
                break;  
  
            case S_INACTIVE:  
                // Serial.print("Inactive");  
                digitalWrite(relayPin, LOW);  
                break;  
        }  
    }  
}
```

Функция расчета КПД зарядной станции по мощности:

```
float getVolt() {  
    uint32_t aver = 0;  
    for (uint8_t i = 0; i < numSamples; i++) {  
        aver += analogReadMilliVolts(voltPin);  
        delay(0.2);  
    }  
    Filter2.Filter(aver);  
    aver = Filter2.Current();  
    float voltage = (float)aver / numSamples / 1000.0f * coeffVoltDiv + voltOffset;
```

```
// Serial.print("Voltage: ");
// Serial.println(voltage);
return voltage;
}

float getEfficiency(float txAmp, float txVolt, float rxAmp, float rxVolt) {
    if (txAmp / txVolt != 0) {
        return (rxAmp * rxVolt / txAmp / txVolt) * 100.0;
    } else return 0.0;}
}
```

Оконная форма разработанной подпрограммы автоматизации приведена на рис. 5.

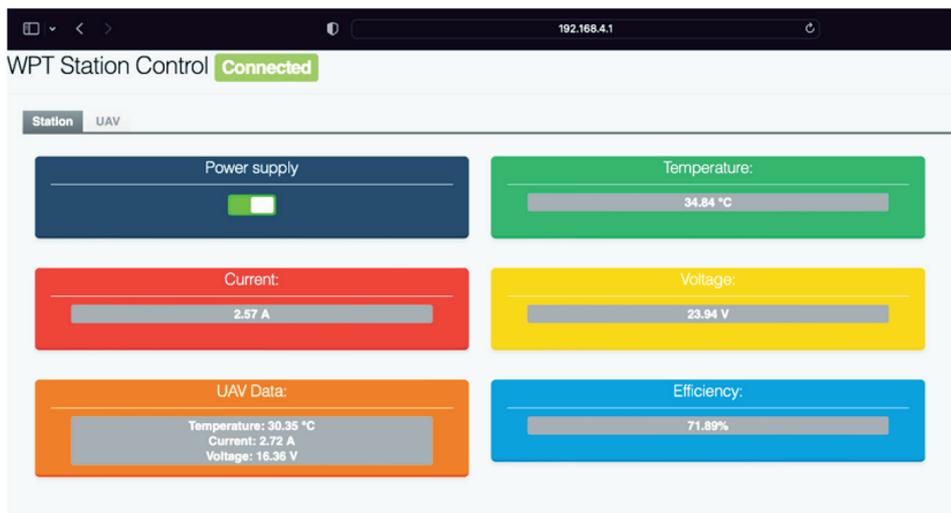


Рис. 5. Графический интерфейс веб-сервера с отображением всех параметров и расчетом коэффициента полезного действия

Программная среда выполнена таким образом, что к точке доступа можно подключиться с любого устройства, оборудованного Wi-Fi модулем, осуществляя управление системой и ее контроль.

Обсуждение (Discussion)

Представленный проект автоматизированной системы для бесконтактной зарядной станции имеет ряд достоинств, среди которых наиболее важным является обеспечение мобильности размещения, возможности установки приемного модуля с катушкой на различных моделях БАС мультироторного типа. Эксперименты проводились при выполнении полетов в закрытом исследовательском летном поле лаборатории беспилотных авиационных систем инженерной школы ГУАП. Важным вопросом является обеспечение аэродинамических свойств при установке приемного модуля. Полный вес приемного модуля составил 352 гр. Для малых дронов даже такой вес является существенным, но для выбранного грузового дрона 550-го размера, который был использован для установки этого оборудования, такой вес позволяет разместить существенную дополнительную полезную нагрузку. Выбранный тип дрона и его модификация наиболее подходят для выполнения полетов на определенной территории (например, между районами морского грузового порта или терминалами) с возможностью доставки дополнительной полезной нагрузки. Достаточно плоский тип приемного модуля не вызывает сильного сопротивления при полете и в некоторых случаях его массогабаритными параметрами можно пренебречь.

При выполнении тестовых полетов был установлен 100 %-й заряд аккумулятора. Скорость перемещения беспилотника при выполнении полета оставалась постоянной. На основании серии

экспериментов (см. пример фрагмента выборки) были получены значения, которые приведены в табл. 2 и на рис. 6).

Таблица 2

Экспериментальные значения получения коэффициентов КПД

Номер эксперимента	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Полученное КПД, %	71,89	68,14	75,23	75,87	65,72	73,33	74,12	78,87	72,15



Рис. 6. Результаты исследования КПД при выполнении различных полетных заданий беспилотной авиационной системы

На основании результатов выполненных полетов были установлены особенности выполнения полетных заданий и взаимодействия с зарядной станцией. Зарядная станция вместе с приемным модулем получилась довольно мощной и эффективной, что позволило заряжать аккумуляторы мощностью 75 Вт при КПД 73,7 %. Максимальный ток заряда 4–5 А, наилучшее расстояние между катушками — 25 мм.

Недостатком является то, что корпус данной подсистемы выполнен из деревянных материалов. Несмотря на использованную специализированную влагостойкую пропитку поверхности этого недостаточно при реальных условиях эксплуатации. Необходимо проведение дополнительных исследований и практических экспериментов с другими материалами для корпуса наземной части зарядной станции.

Заключение (Conclusion)

В связи с активным расширением внедрения беспилотным транспортными системами и разработкой новых пилотных решений задача увеличения времени выполнения полета является актуальной. Решение ее имеет противоречие между аппаратными требованиями наземных зарядных станций, параметрами аккумуляторных батарей и аэродинамическими летными характеристиками, что делает данную задачу сложной и неоднозначной. На практике указанное противоречие приводит к достижению одних параметров при ухудшении характеристик других. Разработанный аппаратный комплекс не должен оказывать существенного влияния на массогабаритные характеристики беспилотной авиационной системы.

В проведенном исследовании решена задача обеспечения заряда беспилотной авиационной системы на уровне КПД 73,3 % — время зарядки составляет 1 ч до максимального уровня. При этом обеспечен баланс между эксплуатационными издержками и моделью развертывания сети подобных зарядных станций. Разработанные аппаратные и программные подсистемы позволяют решить задачу мобильности использования, достижения продолжения выполнения полетного задания беспилотной системы и продолжения полета для решения практических задач морских грузовых портов. Несмотря на проектирование полетных заданий предполагается, что представленное решение автоматизированной станции заряда беспилотных авиационных

систем позволит проектировать в том числе новые маршруты полетных заданий беспилотных транспортных систем как для морских терминалов и транспортных объектов, так и для городских транспортных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Костин А. С.* Эксплуатация беспилотных авиационных систем / А. С. Костин, Н. Н. Майоров, Т. Ю. Карпова. — СПб.: ГУАП, 2021. — 169 с.
2. *Kostin A. S.* Models and methods for implementing the autonomous performance of transportation tasks using a drone / A. S. Kostin // 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECNF). — IEEE, 2021. — Pp. 1–4. DOI: 10.1109/WECNF51603.2021.9470584.
3. *Gonzalez-R P. L.* Truck-drone team logistics: A heuristic approach to multi-drop route planning / P. L. Gonzalez-R, D. Canca, J. L. Andrade-Pineda, M. Calle, J. M. Leon-Blanco // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. — 2020. — Vol. 114. — Pp. 657–680. DOI: 10.1016/j.trc.2020.02.030.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022615497 Российская Федерация. Программа автономного полета беспилотной авиационной системы для реализации многоадресной доставки грузов / Н. Н. Майоров, А. С. Костин, Е. А. Вознесенский; заяв. и патентообл. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. — № 2022615305; заявл. 31.03.2022; опублик. 31.03.2022, Бюл. № 4.
5. Стратегия развития беспилотной авиации Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года, национальный проект «Беспилотные авиационные системы». [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://government.ru/docs/48875/> (дата обращения 20.07.2024).
6. *Outay F.* Applications of unmanned aerial vehicle (UAV) in road safety, traffic and highway infrastructure management: Recent advances and challenges / F. Outay, H. A. Mengash, M. Adnan // Transportation research part A: policy and practice. — 2020. — Vol. 141. — Pp. 116–129. DOI: 10.1016/j.tra.2020.09.018.
7. *Костин А. С.* Разработка автоматизированных решений для исследования вариантов маршрутов доставки при совместном использовании транспортного средства и беспилотной авиационной системы в границах города / А. С. Костин, Н. Н. Майоров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2022. — № 7. — С. 348–356. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-7-348-357.
8. *Jaller M.* Automation, electrification, and shared mobility in urban freight: Opportunities and challenges / M. Jaller, C. Otero-Palencia, A. Pahwa // Transportation Research Procedia. — 2020. — Vol. 46:13–20. — P. 13–20. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.03.158.
9. *Вознесенский Е. А.* Алгоритм точной посадки мультироторных беспилотных авиационных систем на станцию автономной зарядки / Е. А. Вознесенский // Системный анализ и логистика. — 2021. — № 4 (30). — С. 3–10. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-4-3-10.
10. *Язвенко М. Р.* Моделирование процесса доставки грузов беспилотной авиационной системой в границах района города / А. С. Костин, Н. Н. Майоров, М. Р. Язвенко // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: Четвертая Международная научная конференция, Санкт-Петербург, 04–21 апреля 2023 года. Т. Ч. 1. — СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. — 2023. — С. 211–219. DOI: 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-211-219.
11. *Силина А. А.* Исследование модернизации морского пассажирского порта на основе цифрового двойника и оценка инфраструктуры с помощью динамических данных от беспилотных авиационных систем / Н. Н. Майоров, А. А. Силина, В. А. Фетисов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2024. — № 2. — С. 76–88. DOI: 10.24143/2073-1574-2024-2-76-88.
12. *Pillac V.* A review of dynamic vehicle routing problems / V. Pillac, M. Gendreau, C. Guéret, A. L. Medaglia // European Journal of Operational Research. — 2013. — Vol. 225. — Pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.ejor.2012.08.015.
13. *Engel J.* Accurate Figure Flying with a Quadcopter Using Onboard Visual and Inertial Sensing / J. Engel, J. Sturm, D. Cremers // Proc. of the Workshop on Visual Control of Mobile Robots (ViCoMoR) at the IEEE/RJS Intern. Conference on Intelligent Robot Systems (IROS). Vilamoura, Algarve, Portugal. — 2012. — Pp. 43–48.
14. Arduino IDE [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.arduino.cc/en/software/> (дата обращения 01.06.2024).
15. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2022682846 Российская Федерация. Программа автономной базовой станции квадрокоптера для зарядки аккумулятора и передачи данных о дроне с клиентской части в веб интерфейс / А. С. Костин, Е. А. Вознесенский; заяв. и патентообл.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. — № 2022682642; заявл. 28.11.2022; опублик. 28.11.2022. Бюл. № 12.

16. Костин А. С. Информационно-измерительные системы для контроля выполнения траектории авиационной системы / А. С. Костин // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы. Материалы XXIV Международной научной конференции. — СПб.: ГУАП, 2021. — Т. Ч. 1. — С. 219–226. — EDN HUQLIU.

REFERENCES

1. Kostin, A. S., N. N. Maiorov, and T. Yu. Karpova. *Ekspluatatsiya bespilotnykh aviatsionnykh sistem*. SPb.: GUAP, 2021.

2. Kostin, A. S. “Models and methods for implementing the autonomous performance of transportation tasks using a drone.” *2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*. IEEE, 2021. DOI: 10.1109/WECONF51603.2021.9470584.

3. Gonzalez-R, Pedro L., David Canca, Jose L. Andrade-Pineda, Marcos Calle, and Jose M. Leon-Blanco. “Truck-drone team logistics: A heuristic approach to multi-drop route planning.” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 114 (2020): 657–680. DOI: 10.1016/j.trc.2020.02.030.

4. Maiorov, N. N., A. S. Kostin, and E. A. Voznesenskii. RU 2022615497. Programma avtonomnogo poleta bespilotnoi aviatsionnoi sistemy dlya realizatsii mnogoadresnoi dostavki грузов. Russian Federation, assignee. Publ. 31 March 2022.

5. Strategiya razvitiya bespilotnoj aviacii Rossijskoj Federacii na period do 2030 goda i na perspektivu do 2035 goda, nacional'nyj proekt «Bespilotnye aviacionnye sistemy». Web. 20 July. 2024. <<http://government.ru/docs/48875/>>.

6. Outay, Fatma, Hanan Abdullah Mengash, and Muhammad Adnan. “Applications of unmanned aerial vehicle (UAV) in road safety, traffic and highway infrastructure management: Recent advances and challenges.” *Transportation research part A: policy and practice* 141 (2020): 116–129. DOI: 10.1016/j.tra.2020.09.018.

7. Kostin, Anton Sergejevich, and Nikolai Nikolaevich Maiorov. “Development of automated solutions for the research of delivery route options in the joint use of a vehicle and an unmanned aerial system within the boundaries of the city.” *Izvestiya Tula State University* 7 (2022): 348–356. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-7-348-357.

8. Jaller, Miguel, Carlos Otero-Palencia, and Anmol Pahwa. “Automation, electrification, and shared mobility in urban freight: opportunities and challenges.” *Transportation Research Procedia* 46 (2020): 13–20. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.03.158.

9. Voznesensky E. A. “Algorithm for precise landing of multi-rotor UAVs on an autonomous charging station”. *System analysis and logistics*. 4 (30) (2021): 3–10. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-4-3-10.

10. Yazvenko M. Romanovich, A. S. Kostin, and N. N. Maiorov. “Modeling the process of cargo delivery by unmanned aerial system within the city district boundaries” *Aerospace Instrumentation and Operating Technologies: Fourth International Scientific Conference AIOT*, 2023. DOI: 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-211-219.

11. Maiorov N. N., Silina A. A., Fetisov V. A. “Research of modernization of sea passenger port based on digital twin and infrastructure assessment using dynamic data from unmanned aerial systems” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 2 (2024): 76–88. DOI: 10.24143/2073-1574-2024-2-76-88.

12. Pillac V., M. Gendreau, C. Guéret, A. L. Medaglia A review of dynamic vehicle routing problems *European Journal of Operational Research*. 225 (2013): 1–11. DOI: 10.1016/j.ejor.2012.08.015.

13. Engel, Jakob, Jurgen Sturm, and Daniel Cremers. “Accurate Figure Flying with a Quadrocopter Using Onboard Visual and Inertial Sensing.” *Proc. of the Workshop on Visual Control of Mobile Robots (ViCoMoR) at the IEEE/ RJS Intern. Conference on Intelligent Robot Systems (IROS)*. (2012): 43–48.

14. Arduino IDE Web. 1 June.2024. <<https://www.arduino.cc/en/software/>>.

15. Kostin A. S., and E. A. Voznesenskii. RU 2022682846. Programma avtonomnoj bazovoj stancii kvadroptera dlya zaryadki akkumulyatora i peredachi dannyh o drone s klientskoj chasti v veb interfejs. Russian Federation, assignee. Publ. 28 November 2022.

16. Kostin, A.S. “Information-measuring systems for monitoring the aircraft trajectory.” *Volnovaya elektronika i infokommunikatsionnye sistemy. Materialy XXIV Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii*. Vol.1. SPb.: GUAP, 2021: 219–226.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вознесенский Евгений Александрович — аспирант

Научный руководитель:

Майоров Николай Николаевич, д-р техн. наук, доц. ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» 190000, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67, лит. А
e-mail: voznensensky.evgeny@mail.ru

Майоров Николай Николаевич —

доктор технических наук, доцент ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» 190000, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67, лит. А
e-mail: nmsoft@yandex.ru

Терехов Андрей Николаевич —

доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургский государственный университет 198504, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Петергоф, Университетский проспект, 28
e-mail: Andrey.Terekhov@lanit-tercom.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Voznesensky Evgeniy Aleksandrovich — Postgraduate

Supervisor:

Maiorov, Nikolai N.
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67/A Bol'shaya Morskaya Str.,
St. Petersburg, 190000, Russian Federation
email: voznensensky.evgeny@mail.ru

Maiorov, Nikolai N. —

Dr. of Technical Sciences, associate professor
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67/A Bol'shaya Morskaya Str.,
St. Petersburg, 190000, Russian Federation
e-mail: nmsoft@yandex.ru

Terekhov Andrey Nikolayevich —

Doctor of Technical Sciences, Professor Mathematics & Mechanics Faculty, Saint Petersburg State University 198504, Russian Federation, St. Petersburg, Peterhof, Universitetsky Prospekt, 28
e-mail: Andrey.Terekhov@lanit-tercom.com

Статья поступила в редакцию 20 августа 2024 г.

Received: August 20, 2024.

Научное периодическое издание

**Вестник Государственного университета морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

Том 16. № 5

2024 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать с оригинал-макета 31.10.24. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 20,25. Тираж 500 экз. Заказ № 560/24

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7