

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 15. № 4

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

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2023**

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб. : ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2023. — Т. 15. — № 4. — 166 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.



ISSN 2309-5180



© Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 2023

Гл. редактор

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

Зам. гл. редактора

А. П. Нырко
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.

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ
СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 557**

Биргер А. Я., Каретников В. В. Вопросы организации лоцманской
проводки судов (составов) через разводные пролёты мостов
Санкт-Петербурга во время их разводки 557

Аносов А. Н., Лентарёв А. А. Моделирование влияния ветра
на элементы циркуляции судна 567

Подпорин С. А., Холопцев А. В. Современные тенденции
изменения повторяемости опасных ветров в восточном секторе
Российской Арктики 579

Кузнецов А. Л., Галин А. В., Попов Г. Б. Дискретно-событийное
моделирование грузовых фронтов контейнерного терминала 589

Ганнесен В. В., Маликова Т. Е., Петрова Е. Е. Обоснование схемы
технологической операции расформирования контейнерного штабеля
при автоматизации рабочего цикла автопогрузчика 603

Ююкин И. В. Оппортунистическая навигация в аспекте интеграции
альтернативного позиционирования и электронного картографирования
на основе сплайновой технологии 617

**ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА
И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА 633**

Макарчук Н. В., Макарчук А. В., Старцев В. Н. Исследование
структурно-фазовых превращений металла шва и зоны термического
влияния при лазерной сварке 633

**СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ) 646**

Безюков О. К., Жуков В. А., Никифоров В. Г. Развитие научно-технической
базы подготовки специалистов в области судовой энергетики 646

Петров А. И. Оценка условий работы теплообменников двигателя
стирлинга 658

Саушев А. В., Смирнов В. И., Бова Е. В. Терминология, структура
и модель процесса эксплуатации электротехнических систем 666

В. Л. Ерофеев,
д-р техн. наук, проф.

В. А. Жуков,
д-р техн. наук, доц.

Ю. М. Искандеров,
д-р техн. наук, проф.

В. В. Каретников,
д-р техн. наук, доц.

А. В. Кириченко,
д-р техн. наук, проф.

М. Н. Кирсанов,
д-р физ.-мат. наук, проф.

М. А. Колосов,
д-р техн. наук, проф.

Е. А. Королева,
д-р экон. наук, проф.

И. И. Костылев,
д-р техн. наук, проф.

А. Л. Кузнецов,
д-р техн. наук, проф.

В. А. Логиновский,
д-р техн. наук, проф.

А. В. Макишанов,
д-р техн. наук, проф.

В. Е. Марлей,
д-р техн. наук, проф.

Т. А. Пантина,
д-р экон. наук, проф.

В. И. Решняк,
д-р техн. наук, проф.

А. В. Саушев,
д-р техн. наук, доц.

С. В. Смоленцев,
д-р техн. наук, проф.

С. С. Соколов,
д-р техн. наук, доц.

М. В. Сухотерин,
д-р техн. наук, доц.

А. Л. Тезиков,
д-р техн. наук, проф.

А. А. Чертков,
д-р техн. наук, доц.

В. Б. Чистов,
д-р техн. наук, проф.

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ
ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ..... 680**

Абдуллаев О. М. Метод формирования элементов алгоритма проектирования судна обеспечения подводно-технических работ с использованием базы данных однотипных судов 680

Ястребов М. Ю., Комиссаров П. В., Колесниченко С. В. Определение области стабильности технической системы в терминах нечетких множеств 692

Мазур Е. В., Великанов Н. Л., Мазур В. С. Разработка компьютерной программы для анализа структурной целостности элементов судового двигателя 701

CONTENTS

OPERATION OF WATER TRANSPORT, WATERWAYS AND HYDROGRAPHY..... 557

Birger A. Ya., Karetnikov V. V. Issues of organizing vessels pilotage
through the drawbridges spans in St. Petersburg 557

Anosov A. N., Lentarev A. A. Modeling the influence of wind
on ship circulation elements..... 567

Podporin S. A., Kholoptsev A. V. Current frequency variation trends
of dangerous winds in the Eastern sector of the Russian Arctic 579

Kuznetsov A. L., Galin A. V., Popov G. B. Discrete-event modelling
of container terminal cargo fronts 589

Gannesen V. V., Malikova T. E., Petrova E. E. Justification
of the container stack unpacking technological operation scheme
in the automation of the loader work cycle..... 603

Yuyukin I. V. Opportunistic navigation applied to integration
of alternative positioning and electronic mapping based
on spline technology 617

TECHNOLOGY OF SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION..... 633

Makarchuk N. V., Makarchuk A. V., Startsev V. N. Investigation
of structural-phase transformations of weld metal and
in the heat-affected zone during laser welding 633

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)..... 646

Bezjukov O. K., Zhukov V. A., Nikiforov V. G. Development of scientific
and technical base for training specialists in the field of marine energy 646

Volume 15. № 4

2023

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

<i>V. L. Erofeev,</i> Doctor of Technical Sciences	<i>Petrov A. I.</i> Evaluation of the operating conditions of the Stirling engine heat exchangers 658
<i>V. A. Zhukov,</i> Doctor of Technical Sciences	<i>Saushev A. V., Smirnov V. I., Bova E. V.</i> Terminology, structure and model of the electrical systems operation process 666
<i>V. V. Karetnikov,</i> Doctor of Technical Sciences	AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND PRODUCTIONS 680
<i>A. V. Kirichenko,</i> Doctor of Technical Sciences	<i>Abdullayev O. M.</i> Method for the formation of algorithm elements for designing a vessel for the subsea technical operations support using a database of similar vessels 680
<i>M. N. Kirsanov,</i> Doctor of Phys.-Math. Sciences	<i>Yastrebov M. Yu., Komissarov P. V., Kolesnichenko S. V.</i> Determining the area of a technical system stability in fuzzy sets terms..... 692
<i>M. A. Kolosov,</i> Doctor of Technical Sciences	<i>Mazur E. V., Velikanov N. L., Mazur V. S.</i> Development of the computer program for analysis structural integrity of marine engine elements..... 701
<i>E. A. Koroleva,</i> Doctor of Economic Sciences	
<i>I. I. Kostylev,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>A. L. Kuznetsov,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>V. A. Loginovskiy,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>A. V. Makshanov,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>V. Ye. Marley,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>T. A. Pantina,</i> Doctor of Economic Sciences	
<i>V. I. Reshnyak,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>A. V. Saushev,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>S. V. Smolentsev,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>S. S. Sokolov,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>M. V. Sukhoterin,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>A. L. Tezikov,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>A. A. Chertkov,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>V. B. Chistov,</i> Doctor of Technical Sciences	

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-557-566

ISSUES OF ORGANIZING VESSELS PILOTAGE THROUGH THE DRAWBRIDGES SPANS IN ST. PETERSBURG

A. Ya. Birger, V. V. Karetnikov

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

The topic of the work is an overview study of the current problem associated with the complexity of navigation of river vessels and river-sea-going vessels during their passage along the Neva River in the raised spans of St. Petersburg bridges. It is noted that when passing through the raised spans of St. Petersburg bridges in the induced state, such factor as the "surface dimension" is one of the main ones. It is emphasized that large-tonnage river and river-sea-going vessels cannot pass all the bridges of St. Petersburg when they are in the induced state, but since the bridges are drawn at night during navigation period, the height restriction is no longer so strict. Unfortunately, all bridges of St. Petersburg have only one draw span, so reverse navigation is organized through their raised spans in order, firstly, to avoid divergences of vessels in the sections between the bridges and, secondly, to enable the skipper to minimize manoeuvring when choosing the optimal path of entry into the raised span of the bridge. In addition, the attention is drawn to the fact that when entering the drawbridge span, the skipper must take into account many additional factors, including, for example, local navigation features, the actual hydro-meteorological situation and the current hydrological regime of the Neva River. It is noted in the study that the boatmaster should take into account such an important circumstance as the presence of a large number of pleasure craft used for sightseeing viewing of the process of vessel movement through the raised spans of bridges. Due to the fact that boatmasters of large-tonnage river vessels and river-sea-going vessels may experience significant difficulties in the process of organizing navigation safety when moving into the raised bridge spans on the Neva River section within the boundaries of St. Petersburg; mandatory pilotage, some features of the organization of which are considered in this work, has been established. Examples of accidents related to the procedure of bridges drawing that occurred within the boundaries of St. Petersburg and had serious consequences are analyzed. The amendments proposed to be made to the "Rules of movement and mooring of vessels in the Volga-Baltic basin of the inland waterways of the Russian Federation" in relation to the issue under consideration are considered.

Keywords: drawbridge spans, navigation safety, pilotage of vessels, inland waterways, the Neva River.

For citation:

Birger, Arkady Ya., and Vladimir V. Karetnikov. "Issues of organizing vessels pilotage through the drawbridges spans in St. Petersburg." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 557–566. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-557-566.

УДК 656.62; 629.122

ВОПРОСЫ ОРГАНИЗАЦИИ ЛОЦМАНСКОЙ ПРОВОДКИ СУДОВ (СОСТАВОВ) ЧЕРЕЗ РАЗВОДНЫЕ ПРОЛЕТЫ МОСТОВ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА ВО ВРЕМЯ ИХ РАЗВОДКИ

А. Я. Биргер, В. В. Каретников

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

Темой работы является обзорное исследование существующей в настоящее время проблемы, связанной со сложностью навигации речных судов и судов река – море во время прохождения их по реке Нева в разведенные пролеты Санкт-петербургских мостов. Отмечается, что при прохождении в разведенные

пролеты мостов Санкт-Петербурга в наведенном состоянии такой фактор, как «надводный габарит», является одним из основных. Подчеркивается, что крупнотоннажные речные и суда «река – море» плавания не могут пройти все мосты Санкт-Петербурга, когда они находятся в наведенном состоянии, но поскольку мосты в период навигации разводят в ночные часы, ограничение по высоте не является столь жестким. К сожалению, все мосты Санкт-Петербурга имеют только один разводной пролет, поэтому в их разведенные пролеты организуется реверсивное судоходство с целью, во-первых, избежать расхождений судов на участках между мостами и, во-вторых, дать возможность судоводителю минимизировать маневрирование при выборе оптимальной траектории захода в разведенный пролет моста. Кроме того, в статье обращается внимание на то, что при заходе в разводной пролет моста судоводитель должен учитывать множество дополнительных факторов, среди которых, например, местные особенности плавания, фактическая гидрометеорологическая обстановка и текущий гидрологический режим реки Невы. В исследовании отмечается, что судоводитель должен принимать во внимание такое важное обстоятельство, как наличие большого количества прогулочных судов, используемых для экскурсионного просмотра процесса движения судов в разведенные пролеты мостов. Ввиду того, что судоводители крупнотоннажных речных судов и судов «река – море» плавания могут испытывать существенные затруднения в процессе организации безопасности плавания при движении в разведенные пролеты мостов на участке реки Невы, в границах города Санкт-Петербурга установлена обязательная лоцманская проводка, некоторые особенности организации которой рассмотрены в данной работе. Проанализированы примеры аварий, связанных с процедурой разводки мостов, которые произошли в черте Санкт-Петербурга и имели серьезные последствия. Рассмотрены дополнения, которые предлагается внести в «Правила движения и стоянки судов в Волго-Балтийском бассейне внутренних водных путей Российской Федерации» применительно к данному вопросу.

Ключевые слова: разводные пролеты мостов, безопасность судоходства, лоцманская проводка судов, внутренние водные пути, река Нева.

Для цитирования:

Биргер А. Я. Вопросы организации лоцманской проводки судов (составов) через разводные пролёты мостов Санкт-Петербурга во время их разводки / А. Я. Биргер, В. В. Каретников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 557–566. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-557-566.

Введение (Introduction)

Обеспечение безопасности судоходства в период разводки Ленинградских мостов всегда привлекало к себе повышенное внимание как руководства города, так и судовладельческих компаний, капитанов судов в связи со специфичностью и важностью его для организации судоходства на ВВП. Этот участок входит в состав Волго-Балтийского бассейна ВВП и является частью транзитного водного пути между Балтийским, Чёрным и Каспийским морями. Через него также проходят пути, связывающие Балтийское море с Москвой и Белым морем. Волго-Балт активно используется для перевозок судами типа *река – море* различных грузов, включая жидкие нефтепродукты, а также пассажирскими (круизными) теплоходами, осуществляющими популярные круизы по всей единой глубоководной системе России. Повышенная степень ответственности связана с прохождением крупнотоннажных судов через центр Санкт-Петербурга, представляющий огромную историко-культурную ценность и привлекательность для туристов со всего мира.

Ночная разводка мостов является брендом Санкт-Петербурга. На водной акватории Невы десятки прогулочных судов стремятся предоставить своим пассажирам (туристам) оптимальную возможность увидеть прохождение каравана судов через разведенные мосты и количество желающих увидеть это из года в год растет. Прогулочным судам, в соответствии с действующими правилами плавания, запрещается затруднять движение судов, следующих в караванах. С учетом скученности судов на ограниченном участке акватории Невы указанное обстоятельство накладывает дополнительную ответственность на организаторов и участников судоходства. Вопрос ночного судоходства на Неве находится под постоянным пристальным вниманием контрольно-надзорных органов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Организация лоцманской проводки судов, следующих в разведенные пролеты Санкт-Петербургских мостов, является одной из важнейших составляющих общей безопасности судоходства

на этом участке ВВП. Движение в период разводки петербургских мостов является весьма сложной и ответственной процедурой в силу ее специфики. Прежде всего, эти сложности, непосредственно обусловлены навигационными условиями, такими как небольшая ширина разводных пролетов, свальные течения в пролетах, большое количество огней, порой мешающих судоводителю ориентироваться в обстановке и, в дополнение к этому ночной, строго ограниченный по времени период движения судов. При этом количество транзитных судов может достигать до 20–22 единиц в каждом направлении в течение одной ночи.

График разводки петербургских мостов ежегодно утверждается Комитетом по транспорту и Комитетом по развитию транспортной инфраструктуры Правительства Санкт-Петербурга [2]. Поэтому не случайно, что этот участок, в соответствии с Приказом Минтранса России «Перечень участков внутренних водных путей Российской Федерации, типов и размеров судов, подлежащих обязательной лоцманской проводке» [3], является единственным на внутренних водных путях России с обязательной лоцманской проводкой для всех судов.

В силу неразрывной связи процесса судоходства по Неве с жизнедеятельностью городской инфраструктуры, неотъемлемой частью которой являются переправы через Неву, руководство города всегда уделяло этому вопросу повышенное внимание. Так, 9 июля 1984 г. Исполкомом Ленсовета было принято Решение № 473 «Об утверждении Правил пропуска судов при разводке ленинградских мостов» [4]. В этом документе помимо технических условий разводки мостов (период разводки в течение года, ограниченный погодными условиями) впервые было использовано понятие «обязательная лоцманская проводка».

Ответственность за организацию безопасной проводки флота через ленинградские мосты возлагалась на Северо-Западное речное пароходство (СЗРП), которое на тот момент являлось наиболее крупным системообразующим предприятием речного флота в Северо-Западном регионе страны наряду с пароходством «Волготанкер». Общее руководство пропуском судов (независимо от ведомственной принадлежности) при разводке мостов возлагалось на диспетчерскую службу ЛенПорта СЗРП — организацию, являвшуюся одним из подразделений пароходства, которой вменялось в обязанность выполнение лоцманской проводки всех судов. Исключения допускались для кораблей и объектов ВМФ и нефтеналивного флота пароходства «Волготанкер», имеющего своих лоцманов.

Становление лоцманской службы началось с создания института лоцманов-координаторов, в обязанность которых помимо распределения лоцманов на суда входило взаимодействие с диспетчерскими службами ЛенПорта, Мостотреста и Морского порта. В целях качественной всесторонней подготовки лоцманов службе было выделено специальное помещение с учебным классом, приобретены учебные пособия и необходимая картографическая продукция.

Руководством трех задействованных организаций: Морской порт, Мостотрест и ЛенПорт, был разработан «Порядок организации проводки судов с акватории морского порта «Большой порт Санкт-Петербург» (далее — Порядок) [5]. Этот ежегодно обновляемый документ позволяет обеспечивать проведение необходимых мероприятий в ежедневном круглосуточном режиме при планировании движения в разводку на предстоящую ночь. Дежурные службы указанных организаций решают возникающие вопросы в режиме онлайн. От лица ФБУ «Администрация Волго-Балтийского Бассейна внутренних водных путей» (АБВВП) существенную роль в этом играет лоцман-координатор, основной частью работы которого является распределение лоцманов на суда. При этом лоцман-координатор учитывает многие факторы, включая личные качества лоцмана и его опыт работы.

Совместными усилиями руководства лоцманских служб морского порта «Большой порт Санкт-Петербург» и АБВВП налажен процесс обучения и аттестации речных лоцманов с целью получения ими возможности осуществления проводки по акватории порта (в закрытой части) во избежание задержек судов, связанных со сменой лоцманов. Проводка судов через разведенные мосты является весьма специфичной. Движение осуществляется ночью в рамках временного промежутка, ограниченного расписанием разводки. Суда идут одно за другим, в караване. При большом количестве судов, включенных в план разводки, для того, чтобы все они успели пройти, судоводители

должны соблюдать минимальную безопасную дистанцию между судами, вплоть до 200 м при движении вверх и 500 м при движении вниз. При этом скорость судов может достигать 15–20 км/ч. С учетом наличия достаточно сильного (до 4 км/ч) течения на реке снижение скорости судна далеко не всегда оправдано с точки зрения безопасного прохода створа моста. К тому же любой маневр, особенно связанный с изменением скоростного режима, в той или иной степени, оказывает влияние на впереди или сзади идущие суда.

Сложность проводки судов в разводку Петербургских мостов заключается не только в том, чтобы безопасно завести судно в пролет моста, — каждому судоводителю при движении по внутренним водным путям (ВВП) приходится проходить не один десяток мостов. Особенность данного участка петербургских мостов состоит в том, что движение осуществляется в караванах, которые двигаются во встречных направлениях, и в данном случае чрезвычайно важным является *оперативное взаимодействие, согласованность и взаимопонимание между лоцманами*.

В каждой смене лоцманов назначается старший лоцман из числа наиболее опытных. Его основной задачей является посредством своих коллег-лоцманов обеспечить скоординированные действия (маневры) всех судов в караване. Особенно актуальным это является при возникновении нештатных ситуаций. Данная обязанность старшего лоцмана закреплена в одном из пунктов действующей редакции Порядка [5].

20 февраля 1996 г. Приказом Мэрии Санкт-Петербурга № 36 [6], взамен Решения Исполкома Ленсовета от 9 июля 1984 г. № 473 [4] (в настоящее время документ [4] утратил свою актуальность), были утверждены «Правила проводки судов при разводке Санкт-Петербургских мостов» [6]. В этом документе конкретизированы вопросы обязательной лоцманской проводки, в том числе обеспечение лоцманской проводки возложено на государственное бюджетное учреждение «Волго-Балт» — преемника в данном вопросе ЛенПорта СЗРП. При этом утвержден запрет на проводку судов негосударственными лоцманскими службами. 12 мая 1996 г. распоряжением мэра Санкт-Петербурга [7] запрет на работы негосударственных лоцманов как противоречащий действующему законодательству был отменен. В монографии [8] отмечается, что в соответствии с п. 1 ст. 41 «Кодекса внутреннего водного транспорта Российской Федерации» [9] допускается в целях обеспечения безопасности плавания по внутренним водным путям и предотвращения транспортных происшествий с судами создание негосударственных организаций лоцманской проводки судов.

Правительство Санкт-Петербурга всегда с большим вниманием относилось к вопросам безопасности судоходства на Неве. Не случайно, при разработке постановления «Об утверждении правил эксплуатации мостов и набережных в Санкт-Петербурге» [10] в него был внесен раздел, посвященный разводке мостов и порядку пропуска судов при разводке мостов. В соответствии с Постановлением [10, п. 4.9] общее руководство пропуска и ответственность за организацию безопасного пропуска судов через разведенные судоходные пролеты мостов в разводку мостов возлагается на ФБУ «Администрация Волго-Балт».

Существуют обоснованные сомнения в том, что региональные органы власти уполномочены решать вопросы организации судоходства на внутренних водных путях РФ, поскольку река Нева является важной составной частью федеральных водных путей, подведомственных Минтрансу РФ. Однако с учетом специфики судоходства на этом участке, связанного с прохождением крупнотоннажных судов, в том числе с опасными грузами, через сложный для судоходства участок в центре многомиллионного города, озабоченность городских властей в этой части представляется вполне закономерной. В первую очередь это связано с возможными аварийными случаями, которые, в лучшем случае, могут привести к нарушению транспортной логистики (своевременное прибытие к месту происшествия скорой помощи, МЧС, нарушение сроков поставки различной продукции, нарушения в движении городского транспорта и т. п.).

Разводка мостов — бренд Санкт-Петербурга. Десятки тысяч туристов в течение навигационного периода во время экскурсий на прогулочных теплоходах наблюдают за этим завораживающим

зрелищем. Поэтому любое, даже незначительное, происшествие не только может явиться причиной проблем в городском хозяйстве, но и стать предметом гласности и обсуждения в средствах массовой информации, и привести к существенным имиджевым потерям. На рис. 1 приведен скриншот монитора АИС, сделанный в одну из ночей в пиковый период навигации 2023 г., на котором показаны суда, имеющие на борту специальное оборудование АИС, а также маломерные суда, выходящие в это время на акваторию Невы.

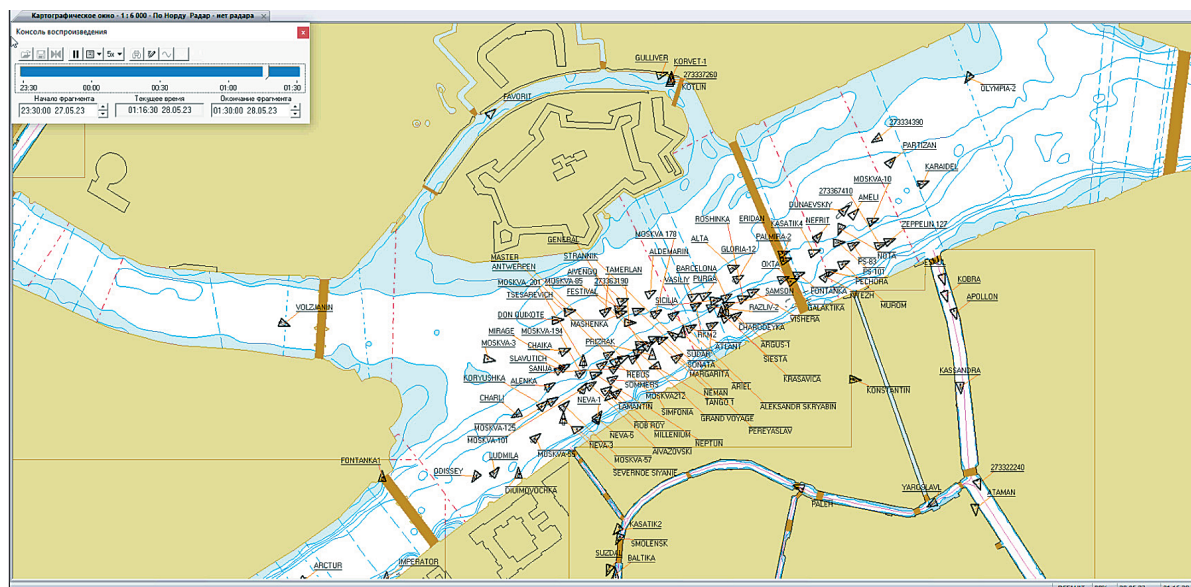


Рис. 1. Скриншот монитора АИС участка р. Невы между Благовещенским и Троицким мостами

За период более 25 лет с момента образования лоцманской службы менялись названия организации, при этом порядок работы службы не претерпевал существенных изменений. Прием на работу в лоцманскую службу осуществляется только после стажировки кандидата в течение периода от одного до трех месяцев под руководством назначаемого для этого лоцмана-наставника. После стажировки выполняется контрольная проводка, по результатам которой принимается решение о допуске лоцмана к самостоятельной работе. При этом следует отметить, что в действующем «Положении о лоцманах на внутренних водных путях» [11] такое понятие, как «стажировка» отсутствует. В п. 9 данного документа указано, что лоцманское удостоверение выдается Администрацией БВВП лицу, «успешно прошедшему практику по лоцманской проводке судов в бассейне ВВП, указываемом в лоцманском удостоверении». Понятие «практика» в данном контексте не конкретизировано.

Очевидно, что практику по лоцманской проводке судов на участке петербургских мостов можно пройти только на данном участке бассейна ВВП. Не имея практических навыков на конкретном участке даже при успешном прохождении теоретических квалификационных испытаний, предусмотренных Положением [11], лоцманом стать невозможно, поскольку для этого в первую очередь необходимы доскональные знания особенностей участка проводки. В лоцманской службе АБВВП, в силу возложенных на нее обязанностей по обеспечению безопасности судоходства, данному вопросу придается первостепенное значение. Не случайно, за последние более чем двадцать лет при проходе караванов судов через мосты Санкт-Петербурга не было зарегистрировано ни одного происшествия, имеющего серьезные последствия.

Приведем примеры аварий, связанных с процедурой разводки мостов, которые произошли в черте нашего города и имели серьезные последствия. 16 августа 2002 г. примерно в 4 ч утра из-за неисправности рулевого устройства произошло затопление в разводном участке Литейного моста теплохода «Каунас» (рис. 2). Судоходство через пролет моста было прервано на неделю.



Рис. 2. Фото терпящего бедствие т/х «Каунас»
в разводном пролете Литейного моста

1 августа 2012 г. в 1 ч 47 мин произошло столкновение (грузового т/х «Келарви» при выходе из Троицкого моста на траверзе реки Фонтанки с прогулочным пассажирским судном «Росси». Причиной явилось нарушение правил плавания судоводителем затонувшего в результате столкновения прогулочного судна. В воде оказались 15 человек. Усилиями городских спасательных служб и экипажей находившихся в акватории других судов все пострадавшие были спасены. Следует заметить, что т/х «Келарви» шел, как обычно при разводке мостов, в составе каравана других грузовых судов. С большой долей вероятности можно предположить, что избежать тяжелых последствий для оказавшихся в воде людей, а также происшествий с другими теплоходами удалось благодаря слаженным действиям лоцманов и диспетчерского аппарата. После этого происшествия в «Правила движения и стоянки судов в Волго-Балтийском бассейне внутренних водных путей Российской Федерации» [12] (далее — Правила) были внесены существенные ограничения движения прогулочных судов по реке Неве, особенно в период разводки мостов.

Как отмечалось ранее, с каждым годом количество прогулочных судов в период белых ночей в водной акватории в центре Санкт-Петербурга увеличивается, и организация безопасного судоходства в данном случае является очень непростой задачей, грамотное решение которой во многом зависит от опыта лоцманов транзитных судов.

Согласно существующей давней традиции, лоцманская служба АБВВП полностью обеспечивала лоцманское обслуживание судов при прохождении разведенных пролетов мостов. Однако в настоящее время имеется тенденция создания частных лоцманских компаний и одна из них уже функционирует в Санкт-Петербурге. Следует отметить, что отсутствие единого руководства при общей организации движения судов через разводные пролеты мостов города Санкт-Петербурга во время их разводки, без сомнения, снизит уровень безопасности. В настоящее время в новую службу перешли лоцманы, получившие всестороннюю подготовку в АБВВП и имеющие достаточный опыт работы. Для них в составе всей лоцманской службы была организована необходимая подготовка, включая стажировку, аттестацию, а также получение необходимых допусков и разрешений для проводки судов, следующих в / из разводки по закрытой части Морского порта и др. В связи с этим необходимо продумать вопрос прохождения необходимой подготовки при пополнении лоцманской службы новыми сотрудниками.

Существует еще одна важная особенность, связанная с функционированием нескольких лоцманских организаций, такая как *количественный состав лоцманов*. В АБВВП он всегда поддерживался с учетом имеющегося опыта, исходя из максимально возможного количества судов и составов к прохождению в разводку в течение одной ночи. Этот вопрос является особенно актуальным на следующую ночь после отмененной по каким-либо причинам разводки (праздничные мероприятия на Неве, погодные условия, плановые профилактические ремонты приводов разводных пролетов мостов и др.).

В последние три-четыре года в силу объективных причин наблюдается существенное снижение судопотока. Это, естественно, влечет за собой проблему, связанную с содержанием лоцманской службы в прежнем количественном составе, которая функционирует за счет приносящей доход деятельности, поскольку не имеет государственного финансирования. При этом изменение себестоимости работ за проводку судна не может быть произведено оперативно, так как предполагает предварительное обоснование и согласование с ФАМРТ. В этом смысле частная лоцманская компания имеет преимущество, поскольку может изменять ставку за проводку судна по своему усмотрению в зависимости от ситуации на рынке и своих возможностей или потребностей.

АБВВП всегда ставит перед собой задачу исключить задержку любого судна, максимально используя для этого возможности сотрудников своей лоцманской службы, так как суточный простой судна влечет за собой существенные непроизводительные расходы для любого судовладельца. Понятно, что интересы лоцманской службы АБВВП и частных лоцманских организаций могут не совпадать. При этом АБВВП при планировании развонок вынуждена учитывать возможности и частных организаций, что зачастую весьма проблематично. В АБВВП выработан порядок подготовки к судоходству в период разводки мостов и движения судов в разведенные мосты, который предполагает тщательный анализ заявки на предстоящую ночь совместно лоцманской и диспетчерской службами, распределение лоцманов на суда, проведение рабочих совещаний старшими лоцманами и капитанами рейда непосредственно перед разводкой и др.

Внутри лоцманской службы предусматривается деление лоцманов на группы в зависимости от опыта и квалификации каждого из них. Так, на сложные буксировки направляются лоцманы, имеющие соответствующий опыт. При этом существует категория лоцманов, которым доверяются проводки только одиночных сухогрузных судов. Используется любая возможность для повышения квалификации (стажировки) лоцманов. Переход из одной группы в другую происходит только после приобретения лоцманом достаточного опыта по решению руководства. Назначение лоцманов на конкретные суда производится с учетом сложности конкретной проводки (буксировки), опыта работы и профессиональных качеств. Особенно это касается сложных буксировок.

Периодически возникает необходимость проводки в разводку мостов сверхгабаритных объектов. В первую очередь это касается вновь построенных на судостроительных заводах судов или их корпусов, в том числе по заказу военно-промышленного комплекса. Таких заводов на Неве несколько. Каждой подобной буксировке предшествует тщательная подготовка, включая проведение в некоторых случаях натурных испытаний на специально создаваемом для этого на акватории Невы полигоне с установкой временных плавучих знаков для имитации пролетов мостов. Во многих случаях требуются дополнительные согласования с городскими структурами, с ГУП «Мостотрест», с РЖД. Эта работа проводится АБВВП при непосредственном участии лоцманской службы.

а)



б)

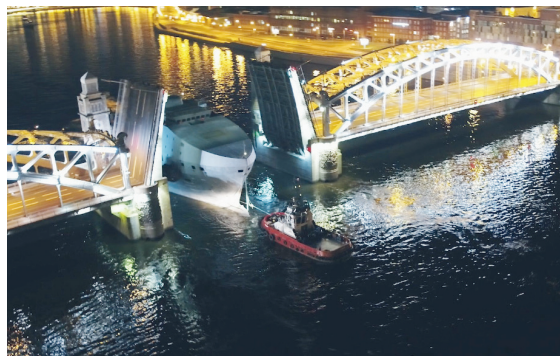


Рис. 3. Проводка исследовательского судна «Академик Агеев»: а — через Троицкий мост; б — через Большеохтинский мост

На рис. 3 в качестве примера показана проводка супергабаритного объекта — океанографического исследовательского судна «Академик Агеев», построенного на судостроительном заводе

«Пелла». Организация буксировки этого объекта потребовала большого объема подготовительных работ, в том числе проведения тренировок на полигоне. С учетом ранее указанных обстоятельств могут возникнуть сложности при направлении на проводку лоцманов из иных, помимо лоцманской службы АБВВП, компаний. Естественно, что судовладелец или его агент при заказе лоцмана преследует свои интересы, но при этом они могут не в полной мере владеть особенностями плана на предстоящую разводку мостов. Решающим фактором здесь может являться стоимость работы, при этом частные компании в данном случае имеют преимущество. Более того, отдельно взятый лоцман при возникновении какой-либо нештатной ситуации, требующей принятия в целях обеспечения общей безопасности вынужденного непопулярного решения в отношении его судна, может продолжать отстаивать интересы компании-нанимателя, что может привести не просто к конфликтным ситуациям, а к созданию аварийной ситуации.

Таким образом, с учетом особенностей организации судоходства на участке ВВП — петербургские мосты можно сделать следующие выводы. Данный участок в процессе решения вопросов по обеспечению безопасности судоходства требует особого отношения. Следует признать, что действующая в настоящее время нормативная база, касающаяся обеспечения лоцманской проводки судов, проходящих через петербургские мосты, недостаточно однозначна. В частности, она не позволяет учитывать в полном объеме то обстоятельство, что в данном случае нельзя рассматривать каждое отдельное судно вне единого плана проводки, а также то, что при планировании разводки необходим более тщательный подход, учитывающий общий состав флота в караване по количеству единиц, наличию буксировок вообще и сложных буксировок в частности. В данной ситуации наиболее приемлемым и доступным способом решения части проблем является внесение в Приказ [12] некоторых дополнений. Соответствующий опыт работы уже имеется. С момента принятия Правил в них неоднократно вносились изменения, направленные на усиление мер безопасности судоходства, в том числе связанные с существенными ограничениями движения судов на акватории Невы в период разводки мостов, что, учитывая особые условия плавания на этом участке, без сомнения, оправдано несмотря на некоторое ущемление интересов судовладельцев. Правила, по сути, отражают «особенности» судоходства в Волго-Балтийском бассейне ВВП, при этом участку петербургских мостов (23 км) в них отводится существенное место.

Результаты (Results)

Применительно к рассматриваемому вопросу предлагается внести следующие дополнения в Правила (выделено курсивом — *Прим. авт.*):

1. Изложить второй абзац п. 3 Правил [12] в следующей редакции: *«Движение составов, отличающихся по своим техническим характеристикам от типовых схем формирования составов и движение одиночных судов габаритной длиной более 142 м, а также назначение лоцманов на эти составы и суда осуществляются по согласованию с АБВВП».*

2. В п. 9, содержащий требования к осуществлению движения судов (составов) через разводные пролеты мостов во время их разводки, добавить пп. 10, 11 (со сноской) следующего содержания:

10) *«указания назначенных АБВВП старших лоцманов в части организации безопасной проводки караванов судов являются обязательными для исполнения всеми лоцманами идущих в караванах судов»;*

11) *«лоцман для допуска к проводке судов (составов) через разводные пролеты мостов Санкт-Петербурга должен пройти стажировку под руководством специалистов лоцманской службы АБВВП*».*

*Результаты стажировки, а также документальное подтверждение прохождения практики по лоцманской проводке судов на участке мостов Санкт-Петербурга должны учитываться при получении лоцманского удостоверения в соответствии с п. 9 Положения о лоцманах на ВВП (Приказ Минтранса России от 6 ноября 2020 г. № 463)».

Предполагается, что процедура стажировки должна быть разработана АБВВП и доведена до сведения заинтересованных организаций.

Заключение (Conclusion)

В статье выполнен обзор некоторых важных вопросов, связанных с обеспечением безопасности судоходства во время движения караванов транзитных судов на уникальном участке ВВП в период разводки Санкт-Петербургских мостов. При этом особое внимание уделено проблемам организации лоцманских проводок этих судов. Отдельно выделен вопрос функционирования на этом участке водного пути негосударственных лоцманских организаций, в том числе в части их взаимодействия с лоцманской службой АБВВП. Предлагаемые дополнения в ПДСС, направленные на повышение уровня безопасности судоходства на чрезвычайно важном и ответственном участке судоходства, требующем особого внимания, позволят в определенной мере конкретизировать некоторые формулировки в нормативных документах и внести ясность в вопросы, связанные с оперативной работой лоцманской службы как с учетом накопленного многолетнего опыта, так и новых тенденций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас единой глубоководной системы европейской части РФ. Т. 3, ч. 1: Волго-Балтийский водный путь. Река Нева. — СПб.: Волго-Балт, 2023. — 64 с.
2. График разводки Санкт-Петербургских мостов в навигацию 2023 года // Официальный интернет-сайт ФБУ «Администрация «Волго-Балт» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.volgo-balt.ru (дата обращения: 02.06.2023).
3. Приказ Минтранса РФ от 04.09.2003 № 182 «Об утверждении перечня участков внутренних водных путей Российской Федерации, типов и размеров судов, подлежащих обязательной лоцманской проводке» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_44374/ (дата обращения: 02.06.2023).
4. Решение Ленинградского городского Совета народных депутатов от 9 июля 1984 года № 473 «Об утверждении Правил пропуска судов при разводке ленинградских мостов» (Утратило силу на основании приказа КУГХ мэрии Санкт-Петербурга от 20 февраля 1996 года № 36) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/8358918> (дата обращения: 02.06.2023).
5. Порядок организации проводки судов с акватории морского порта «Большой порт Санкт-Петербург» в разводку мостов на внутренние водные пути и в обратном направлении на навигацию 2023 года // Официальный интернет-сайт ФБУ «Администрация «Волго-Балт» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.volgo-balt.ru (дата обращения: 02.06.2023).
6. Приказ Мэрии Санкт-Петербурга от 20 февраля 1996 № 36 «Об утверждении «Правил проводки судов при разводке Санкт-Петербургских мостов» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/9105583> (дата обращения: 02.06.2023).
7. Распоряжение мэра Санкт-Петербурга от 12 мая 1996 года № 464-р «О Правилах проводки судов при разводке Санкт-Петербургских мостов». (Утратило силу на основании постановления Правительства Санкт-Петербурга от 19 января 2022 года № 14) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/9105894?marker> (дата обращения: 02.06.2023).
8. Гречуха В. Н. Правовое регулирование деятельности внутреннего водного транспорта: монография / В. Н. Гречуха. — М.: Прометей, 2020. — 340 с.
9. Федеральный закон от 7 марта 2001 года № 24-ФЗ «Кодекс внутреннего водного транспорта Российской Федерации» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://mchs.gov.ru/dokumenty/federalnyy-zakon/795> (дата обращения: 02.06.2023).
10. Постановление Правительства Санкт-Петербурга от 29 ноября 2006 № 1480 «Об утверждении правил эксплуатации мостов и набережных в Санкт-Петербурге» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/8441055> (дата обращения: 02.06.2023).
11. Приказ Минтранса РФ от 06.11.2020 № 463 «Об утверждении положения о лоцманах на внутренних водных путях» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_372126/ (дата обращения: 02.06.2023).
12. Приказ Минтранса РФ от 10 июля 2013 г. № 235 «Об утверждении правил движения и стоянки судов в Волго-Балтийском бассейне внутренних водных путей Российской Федерации» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://rulaws.ru/acts/Prikaz-Mintransa-Rossii-ot-10.07.2013-N-235/> (дата обращения: 02.06.2023).

REFERENCES

1. *Atlas edinoi glubokovodnoi sistemy evropeiskoi chasti RF. Tom 3, chast' 1. Volgo-Baltiiskii vodnyi put'.* Reka Neva. SPb.: Volgo-Balt, 2023.
2. Grafik razvodki Sankt-Peterburgskikh mostov v navigatsiyu 2023 goda. Volgo-Balt Administration official website. Web. 2 Jun. 2023 <www.volgo-balt.ru>.
3. Prikaz Mintransa RF ot 04.09.2003 № 182 «Ob utverzhdenii perechnya uchastkov vnutrennikh vodnykh putei Rossiiskoi Federatsii, tipov i razmerov sudov, podlezhashchikh obyazatel'noi lotsmanskoj provodke». Web. 2 Jun. 2023 <http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_44374/>.
4. Reshenie Leningradskogo gorodskogo Soveta narodnykh deputatov ot 9 iyulya 1984 goda № 473 «Ob utverzhdenii Pravil propuska sudov pri razvodke leningradskikh mostov». Web. 2 Jun. 2023 <<https://docs.cntd.ru/document/8358918>>.
5. Poryadok organizatsii provodki sudov s akvatorii morskogo porta «Bol'shoi port Sankt-Peterburg» v razvodku mostov na vnutrennie vodnye puti i v obratnom napravlenii na navigatsiyu 2023 goda. Volgo-Balt Administration official website. Web. 2 Jun. 2023 <www.volgo-balt.ru>.
6. Prikaz Merii Sankt-Peterburga ot 20 fevralya 1996 № 36 «Ob utverzhdenii «Pravil provodki sudov pri razvodke Sankt-Peterburgskikh mostov». Web. 2 Jun. 2023 <<https://docs.cntd.ru/document/9105583>>.
7. Rasporyazhenie mera Sankt-Peterburga ot 12 maya 1996 goda № 464-r «O Pravilakh provodki sudov pri razvodke Sankt-Peterburgskikh mostov». Web. 2 Jun. 2023 <<https://docs.cntd.ru/document/9105894?marker>>.
8. Grechukha, V. N. *Pravovoe regulirovanie deyatel'nosti vnutrennego vodnogo transporta. Monografiya.* M.: Prometei, 2020.
9. Federal'nyi zakon ot 7 marta 2001 goda № 24-FZ «Kodeks vnutrennego vodnogo transporta Rossiiskoi Federatsii». Web. 2 Jun. 2023 <<https://mchs.gov.ru/dokumenty/federalnye-zakony/795>>.
10. Postanovlenie Pravitel'stva Sankt-Peterburga ot 29 noyabrya 2006 № 1480 «Ob utverzhdenii pravil ekspluatatsii mostov i naberezhnykh v Sankt-Peterburge». Web. 2 Jun. 2023 <<https://docs.cntd.ru/document/8441055>>.
11. Prikaz Mintransa RF ot 06.11.2020 № 463 «Ob utverzhdenii polozheniya o lotsmanakh na vnutrennikh vodnykh putyakh». Web. 2 Jun. 2023 <http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_372126/>.
12. Prikaz Mintransa RF ot 10 iyulya 2013 g. № 235 «Ob utverzhdenii pravil dvizheniya i stoyanki sudov v Volgo-Baltiiskom basseine vnutrennikh vodnykh putei Rossiiskoi Federatsii». Web. 2 Jun. 2023 <<https://rulings.ru/acts/Prikaz-Mintransa-Rossii-ot-10.07.2013-N-235/>>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Биргер Аркадий Яковлевич — доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: birgeraya@gumrf.ru
Каретников Владимир Владимирович —
доктор технических наук, доцент
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

Birger, Arkady Ya. — Associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: birgeraya@gumrf.ru
Karetnikov, Vladimir V. —
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: karetnikovvv@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 14 июня 2023 г.
Received: June 14, 2023.

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-567-578

MODELING THE INFLUENCE OF WIND ON SHIP CIRCULATION ELEMENTS

A. N. Anosov, A. A. Lentarev

Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy,
Vladivostok, Russian Federation

When solving a number of practical problems of navigation and ship maneuvering, it is necessary to take into account the effect of wind on the parameters of the ship motion, including curvilinear motion, in particular, on circulation. There is very little information on this problem, especially in terms of quantitative estimates of the wind impact on circulation elements. Based on this, the purpose of this work is to study the effect of wind on the circulation elements based on mathematical modeling and to determine quantitative estimates of this effect when changing such factors as wind speed and heading angle, ship length and rudder angle. The simulation is carried out on a certified navigation simulator Transas NT Pro-5000. The mathematical model of vessel movement and wind effect used in this simulator is presented in the paper. A description of three simulated container ships with similar aerodynamic characteristics is given for the various heading angle and velocity of the wind before the start of the turn. In some experiments, the rudder angle is changed. The results of the simulation are presented in tabular and graphical forms. Quantitative estimates of the displacement of the turning points on the circulation by 90°, 180°, 270° and 360° at wind influence from the corresponding points of circulation in the absence of wind. The graphical dependences of these displacements on the heading angle of the wind and their analytical approximations are presented. The ranges of the wind heading angles at which the maximum effect of the wind on the circulation elements is observed are established. Quantitative estimates of the inversely proportional dependence of the circulation elements on the ship length are calculated. The hypotheses of the other authors about the direction of displacement of the circulation curve under wind action are tested. To verify the validity and reliability of the results obtained, it is necessary to perform similar studies using other mathematical models and natural experiments.

Keywords: vessel, circulation, modeling, wind action, mathematical model, simulator.

For citation:

Anosov, Alexey A., and Alexander A. Lentarev. "Modeling the influence of wind on ship circulation elements." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 567–578. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-567-578.

УДК 656.61.052.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕТРА НА ЭЛЕМЕНТЫ ЦИРКУЛЯЦИИ СУДНА

А. Н. Аносов, А. А. Лентарёв

МГУ им. адм. Г. И. Невельского, Владивосток, Российская Федерация

Темой исследования является учет в ходе решения практических задач влияния ветра на параметры движения судна, в том числе при криволинейном движении, в частности, на циркуляции. Отмечается, что объем информации по этой проблеме крайне мал, особенно в части количественных оценок ветрового воздействия на элементы циркуляции. Исходя из этого цель данной работы заключалась в исследовании воздействия ветра на элементы циркуляции на основе математического моделирования и определении количественных оценок этого воздействия при изменении таких факторов, как скорость и курсовой угол ветра, длина судна, угол перекладки руля. Моделирование выполнялось на сертифицированном навигационном тренажере Transas NT Pro-5000. В работе приведена используемая в этом тренажере математическая модель движения судна и учета ветрового воздействия. Дано описание трех моделируемых судов-контейнеровозов с похожими аэродинамическими характеристиками. Выполнено моделирование движения судов на циркуляции при различных значениях курсового угла ветра перед началом поворота и при двух значениях скорости ветра. В отдельных экспериментах изменялся угол перекладки руля. Результаты моделирования представлены в табличном и графическом виде. Определены количественные оценки смещения точек поворота на циркуляции на 90°, 180°, 270° и 360° при ветровом воздействии от соответствующих точек циркуляции при отсутствии

ветра. Представлены графические зависимости этих смещений от курсового угла ветра и их аналитические аппроксимации. Установлены диапазоны курсовых углов ветра, при которых наблюдалось максимальное влияние ветра на элементы циркуляции. Рассчитаны количественные оценки обратно пропорциональной зависимости элементов циркуляции от длины судна. Проверены гипотезы других авторов исследований о направлении смещения кривой циркуляции при ветровом воздействии. Отмечается, что для проверки обоснованности и достоверности полученных результатов необходимо выполнение подобных исследований с использованием других математических моделей и натурных экспериментов.

Ключевые слова: судно, циркуляция, моделирование, ветровое воздействие, математическая модель, тренажер.

Для цитирования:

Аносов А. Н. Моделирование влияния ветра на элементы циркуляции судна / А. Н. Аносов, А. А. Лентарев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 567–578. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-567-578.

Введение (Introduction)

Воздух, так же, как и вода, обладает свойством фрикционного и вихревого сопротивления движению судна. Воздействие ветра на судно проявляется в том, что к его надводной части прилагается аэродинамические силы, величина которых зависит от формы надстроек, силы и направления (курсавого угла) ветра относительно судна. Составляющие аэродинамических сил, действующих в плоскости ватерлинии, в той или иной степени влияют на элементы горизонтального движения судна. Методика расчета аэродинамических сил и моментов представлена в классических работах по теории корабля (см., например, [1]). Для приближенной оценки ветрового сопротивления можно воспользоваться рекомендацией, приведенной в работе [2], где утверждается, что при отсутствии ветра сопротивление воздуха составляет 2–4 % от сопротивления воды. В случае, если судно идет против ветра, имеющего такую же скорость, как и судно, то скорость кажущегося ветра возрастает в два раза, а его сопротивление движению судна — в 4 раза, т. е. достигает 8–16 % от величины сопротивления воды.

В практических задачах по навигации и управлению судном (например, при учете угла ветрового дрейфа при счислении и расчете ветроволновых потерь скорости) учитывается главным образом ветровое воздействие на прямолинейное движение судна. В то же время в практической навигации существует ряд задач (например, планирование и выполнение поворота или расчет точки невозврата в условиях ветра), когда необходимо учитывать влияние ветра на движение судна по криволинейной траектории, в частности, на циркуляции. К сожалению, имеющаяся информация о влиянии ветра на циркуляцию судна недостаточна и отчасти противоречива. Так, качественные оценки этого явления в теории корабля сводятся к тому, что кривая циркуляции при воздействии ветра смещается в направлении ветра [1]. В то же время в работе [3] утверждается, что кривая циркуляции на ветре смещается от линии ветра в сторону, противоположную стороне перекладки руля под некоторым углом. В работе [4] на основе математического моделирования показано, что траектория циркуляции, которая смещается строго в направлении ветра и определенная Р. Я. Перщицем как типичная, имеет место лишь при определенных соотношениях скорости ветра и угла перекладки руля. В общем случае смещение траектории происходит и в перпендикулярном ветру направлении. В работе [5] представлены результаты математического моделирования движения судна на циркуляции в условиях постоянного ветра и регулярного волнения. В этом случае кривые циркуляции смещаются примерно под углом 45° от линии ветра в сторону поворота судна. Таким образом, исходя из выводов, представленных в работах [1]–[5], качественные оценки смещения циркуляции под действием ветра находятся в диапазоне от «строго по ветру» до «в перпендикулярном ветру направлении».

Что касается количественных оценок влияния ветра на параметры циркуляции судна, то информации об этом крайне мало. Результаты поиска в интернете по ключевым словам показали, что среди немногочисленных работ о влиянии ветра на циркуляцию лишь в нескольких из них в той или иной мере рассматривается проблема количественных изменений параметров циркуляции под действием ветра. Группа хорватских ученых из университетов Риеки и Задара в работе [6]

представили результаты двух натурных экспериментов, в которых пассажирский паром типа ро-ро длиной 126 м, имеющий большую парусность, совершал циркуляцию на правый и левый борт без ветра и при боковом ветре скоростью 20 уз и максимальном угле перекладки руля 35°. Анализ результатов экспериментов показал, что в условиях ветрового воздействия тактический радиус циркуляции при левом повороте увеличился на 37,1 %, при правом повороте — на 21,5 %, а увеличение выдвиг составило, соответственно, 67,9 % и 43,1 %. В диссертационном исследовании Ней Зо Аунга [7] на основе математического моделирования показано, что при попутном ветре скоростью 12 м/с тактический радиус циркуляции накатного судна увеличился на 6 м. Как видно, для формирования системного подхода к рассматриваемой проблеме релевантной информации недостаточно.

С учетом выполненного библиографического анализа целью данной работы являлось исследование воздействия ветра на элементы циркуляции на основе математического моделирования и определение количественных оценок этого воздействия при изменении таких факторов, как скорость и курсовой угол ветра, длина судна, угол перекладки руля.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Моделирование выполнялось на сертифицированном навигационном тренажере Transas NT Pro 5.40. Используемая в этом тренажере математическая модель движения судна несколько отличается от традиционных классических моделей, представленных в работах как отечественных, так и зарубежных ученых (см., например, [1], [8], [9]). В математической модели тренажера для формализации движения судна используются три декартовых системы координат [10]:

- наземная система $X_0Y_0Z_0$ с началом координат в некоторой точке O_0 , неподвижной относительно земной поверхности (ось X_0 направлена на север, ось Y_0 — на восток, ось Z_0 — вниз по направлению силы тяжести);
- подвижная система XYZ , начальная точка которой совпадает с центром тяжести судна (ось X направлена по диаметральной плоскости, ось Y — перпендикулярно вправо от оси X , ось Z — по направлению силы тяжести);
- местная подвижная система $X_1Y_1Z_1$, которая образуется, если систему координат перенести в центр тяжести судна, направления осей при этом сохраняются.

Следует отметить, что в классических моделях оси Z_0 , Z и Z_1 направлены вверх [8]. В начальный момент моделирования системы координат $X_0Y_0Z_0$ и $X_1Y_1Z_1$ совпадают. Проекции вектора скорости бортовой качки, килевой качки и рыскания (соответственно p , q и r) относительно осей подвижной системы XYZ определяются с помощью следующих кинематических уравнений Эйлера:

$$p = \dot{\varphi} - \dot{\psi} \sin \theta;$$

$$q = \dot{\theta} \cos \varphi + \dot{\psi} \cos \theta \sin \varphi;$$

$$r = -\dot{\theta} \sin \varphi + \dot{\psi} \cos \theta \cos \varphi.$$

При использовании этих уравнений в общей модели движения судна они решаются относительно $\dot{\varphi}$, $\dot{\theta}$, $\dot{\psi}$, которые являются, соответственно, углами бортовой качки, килевой качки и рыскания.

Уравнения движения судна при шести степенях свободы в системе координат XYZ имеют следующий вид:

$$m(\dot{u}_0 - v_0 r + \omega_0 q) = X;$$

$$m(\dot{v}_0 + u_0 r - \omega_0 p) = Y;$$

$$m(\dot{w}_0 - u_0 q + v_0 p) = Z;$$

$$I_{x_c} \dot{p} + (I_{z_c} - I_{y_c}) q r = K;$$

$$I_{y_c} q + (I_{x_c} - I_{z_c}) rp = M;$$

$$I_{x_c} pr + (I_{y_c} - I_{z_c}) pq = N,$$

где X, Y, Z — суммарные силы, действующие на судно по осям системы координат XYZ ;

K, M, N — суммарные моменты относительно осей системы координат XYZ соответственно.

Интегрированием первых трех уравнений движения обеспечивается определение составляющих скорости судна u, v, w , соответственно, по осям XYZ , а интегрированием трех последних уравнений — определение векторов скорости бортовой качки, килевой качки и рыскания (p, q и r) относительно осей XYZ . Суммарные силы X, Y, Z и моменты K, M, N учитывают инерцию, гидродинамическое, аэродинамическое и волновое воздействия, влияние работы винта, руля и подруливающих устройств, взаимодействие с другими судами, силы натяжения якорной цепи и швартовых концов. В частности, для учета влияния ветра используются аэродинамические силы X_A и Y_A и моменты N_A и M_A , рассчитываемые следующим образом:

$$X_A = -C_{XA}(\gamma_R) \frac{\rho_A V_{RW}^2}{2} A_T;$$

$$Y_A = C_{YA}(\gamma_R) \frac{\rho_A V_{RW}^2}{2} A_L;$$

$$N_A = C_{NA}(\gamma_R) \frac{\rho_A V_{RW}^2}{2} A_L L;$$

$$M_A = \bar{A} \bar{G} z Y_A,$$

где V_{RW} и γ_R — соответственно скорость и курсовой угол кажущегося ветра;

A_T и A_L — соответственно площади поперечной и продольной проекций надводной части судна.

Безразмерные коэффициенты C_{XA}, C_{YA} и C_{NA} рассчитываются с учетом курсового угла ветра γ_R и конфигурации надводной части судна. Обоснованность формул для определения этих коэффициентов подтверждена сравнением расчетов с натурными испытаниями в аэродинамической трубе.

Математическая модель ветрового воздействия на судно включает две составляющие: постоянный ветер на высоте 6 м над уровнем моря; случайный порывистый ветер, параметры которого рассчитываются на основе спектральных характеристик турбулентной и волновой составляющих. Кроме того, в математической модели движения судна учитывается также ветровое волнение, рассчитываемое с использованием стандартного волнового спектра Пирсона – Москвича [10].

Эксперименты по моделированию движения на циркуляции в условиях ветрового воздействия выполнялись с использованием трех судов-контейнеровозов, основные характеристики которых представлены, соответственно, в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики моделируемых судов

Моделируемые судна	Водо-измещение, т	Длина, м	Ширина, м	Осадка, м	Высота надводной части борта, м	Мощность главного двигателя, кВт	Максимальная скорость, уз
Судно 1	5530	90	14,5	6,3	25,4	3263	16,0
Судно 2	32910	190	30,0	11,1	47,5	17316	20,1
Судно 3	135651	324	42,8	14,6	47,0	68640	23,2

Далее при анализе результатов моделирования контейнеровозы представлены как «судно 1», «судно 2» и «судно 3» соответственно. Во многом совпадающие профили этих судов (вид сбоку) приведены на рис. 1. Отношение площадей надводной и подводной частей для всех трех судов составило примерно 2/1.

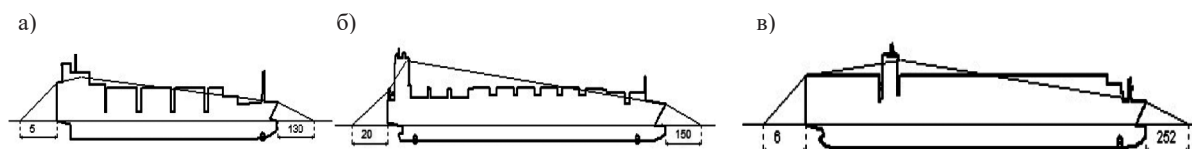


Рис. 1. Профили моделируемых судов 1–3:
а — судно 1; б — судно 2; в — судно 3

Моделирование выполнялось при максимальной скорости судов и максимальном угле перекадки руля 30° , за исключением отдельных экспериментов, когда значения этих параметров оговаривались отдельно. Для контроля положения изменения кривой циркуляции были выбраны четыре точки поворота: на 90° , 180° , 270° и 360° . Модификация кривой циркуляции в результате влияния ветра определялась отклонением этих точек поворота от их положения при отсутствии ветра.

В ходе работы было установлено, что при повторном выполнении эксперимента при аналогичных условиях количественные оценки параметров циркуляции (выдвиг, прямое смещение, тактический радиус) различались в среднем на 3–6 %. Очевидно, это объясняется случайным характером порывистой составляющей ветра и ветрового волнения в математической модели движения судна. Поэтому в экспериментах, которые повторялись три раза, в качестве итоговых оценок параметров циркуляции использовались осредненные данные.

Результаты (Results)

Результаты моделирования с целью оценки влияния ветрового воздействия на параметры циркуляции судна представлены в табличном и графическом виде. Для оценки этого влияния для курсовых углов 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° и 315° ветра скоростью 20 и 40 м/с измерялись продольные и поперечные смещения точек поворота судна при циркуляции на 90° , 180° , 270° и 360° от соответствующих точек при отсутствии ветра. Продольные отклонения отсчитывались по направлению линии курса на момент начала циркуляции, поперечные — поперек линии первоначального курса. Точность измерения составила ± 1 м. Следует отметить, что при этом не учитывался угол дрейфа на циркуляции. Численные значения поперечных и продольных смещений точек поворота судна при циркуляции на 90° , 180° , 270° и 360° приведены в табл. 2 и 3 при скорости ветра 20 и 40 м/с соответственно.

Таблица 2

Поперечные и продольные смещения точек поворота на 90° , 180° , 270° и 360° при скорости ветра 20 м/с

Моделируемые суда	Угол поворота судна на циркуляции	Координаты точки поворота без ветра (XY), М	Поперечные и продольные смещения точек поворота ($\Delta X/\Delta Y$) при курсовом угле ветра, м							
			0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Судно 1	90°	176	–1	–10	–6	0	2	0	1	2
		293	0	5	9	10	7	9	8	5
	180°	315	0	–8	–9	–3	5	5	9	11
		178	–13	–4	9	7	3	3	1	–6
	270°	191	0	–9	–16	–3	12	14	15	8
		48	–12	–11	1	11	13	5	–2	–9
	360°	72	–2	–12	–21	–13	3	16	19	9
		174	–20	–13	3	14	20	4	–14	–23
Судно 2	90°	263	0	6	–4	9	11	8	2	7
		507	–2	–6	–10	–10	0	19	20	2
	180°	483	1	–6	–8	–5	1	1	8	9
		296	–2	0	1	1	1	2	4	–1
	270°	276	5	–7	–23	–6	8	11	13	12
		83	–17	–15	–5	5	7	7	2	–7
	360°	70	6	–10	–21	–18	–3	11	18	16
		298	–10	–14	–2	14	32	23	4	–10

Окончание табл. 2

Судно 3	90°	776 1089	3 -5	-14 -6	-13 -2	-1 10	13 11	13 12	-10 9	-4 5
	180°	1417 415	6 -3	-8 8	-15 13	-6 26	9 22	12 33	13 43	18 1
	270°	752 -217	2 -22	-11 -24	-25 -7	1 20	5 22	25 10	17 0	37 -8
	360°	148 402	-1 9	-23 -30	-34 19	-24 44	3 46	27 20	31 -9	23 -18

Таблица 3

**Поперечные и продольные смещения точек поворота на 90°, 180°, 270° и 360°
при скорости ветра 40 м/с**

Моделируемые суда	Угол поворота судна на циркуляции	Координаты точки поворота без ветра (X/Y), м	Смещения точек поворота ($\Delta X/\Delta Y$) при курсовом угле ветра, м							
			0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Судно 1	90°	176 293	-8 17	-17 14	-16 22	-7 17	2 20	8 35	32 37	10 9
	180°	315 178	-12 -42	-20 -24	-23 21	-6 24	1 5	6 21	30 19	17 -15
	270°	191 48	11 -42	-38 -24	-66 21	-26 24	27 5	45 21	51 19	25 -15
	360°	72 174	4 -69	-52 -47	-79 -2	-59 44	-6 57	52 51	74 -14	35 -55
Судно 2	90°	263 507	2 9	7 -5	9 5	2 9	7 8	7 17	37 18	27 2
	180°	483 296	18 -44	-8 -17	-26 -1	-20 5	-12 12	2 22	29 24	37 -12
	270°	276 83	32 -49	36 -45	-73 -37	-65 6	7 36	25 44	47 37	57 -4
	360°	70 298	17 -58	-21 -51	-78 -34	-88 34	-42 90	26 91	70 26	72 -25
Судно 3	90°	776 1089	-30 -20	-46 -26	-35 -11	-45 1	-26 5	-25 7	-12 21	-10 -2
	180°	1417 415	30 -53	-29 1	-51 21	-23 62	7 57	30 39	48 40	55 37
	270°	752 -217	9 -74	-52 -84	-115 -29	-41 47	31 54	70 51	81 15	52 -24
	360°	148 402	13 -83	-75 -31	-120 14	-90 75	-8 119	78 87	116 -8	88 -42

Для обеспечения возможности визуальной оценки некоторые результаты моделирования представлены в графическом виде. Так, на рис. 2 показаны экспериментальные зависимости продольного и поперечного смещения точек поворота на 270° в зависимости от курсового угла ветра скоростью 20 м/с. Влияние скорости ветра (20 и 40 м/с) на примере поперечного смещения точки поворота на 270° показано на рис. 3. Еще одна форма представления данных о смещении точек поворота на 360° в зависимости от скорости ветра приведена на рис. 4.

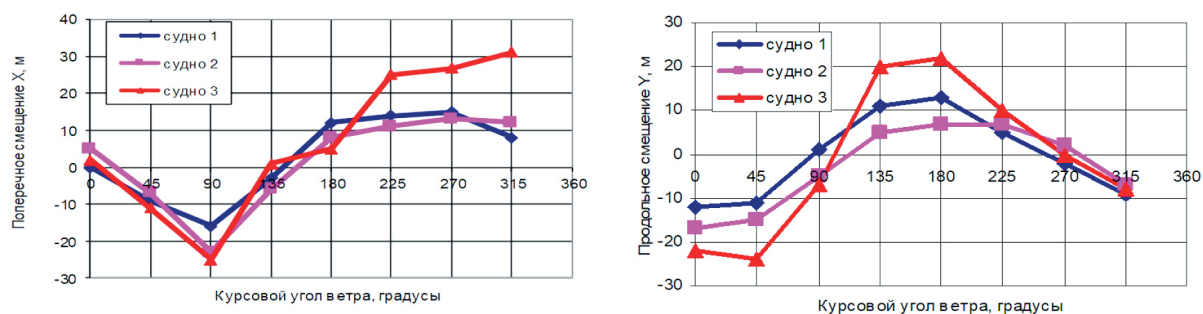


Рис. 2. Зависимость поперечного и продольного смещения точки поворота на 270° от курсового угла ветра скоростью 20 м/с

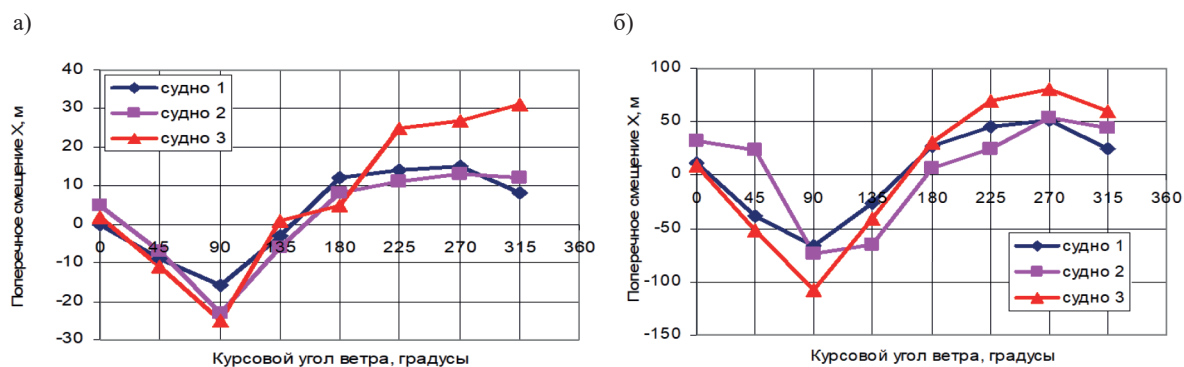


Рис. 3. Зависимость поперечного смещения точки поворота на 270° при силе ветра 20 м/с (а) и 40 м/с (б)

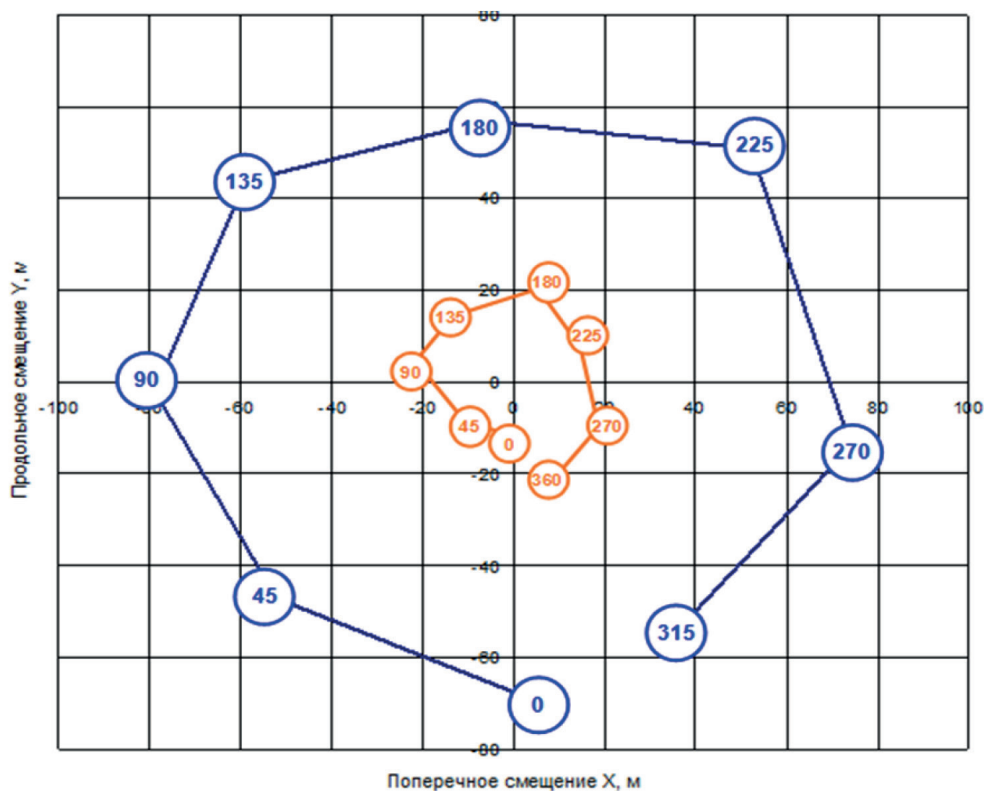


Рис. 4. Смещение точки поворота на 360° судна 1 воздействию ветра
(— ветер 20 уз; — ветер 40 уз;
цифра в кружке — курсовой угол ветра на начало поворота)

Для проверки гипотез о смещении кривых циркуляции при воздействии ветра, предложенных в работах [1]–[5], выполнено моделирование шести последовательных циркуляций при угле поворота руля 15° и ветре, скорость которого составляет 20 м/с, действующем при курсовых углах 0° , 90° , 180° и 270° . Результаты моделирования приведены на рис. 5, на котором показаны смещения кривой циркуляции при воздействии ветра четырех главных направлений.

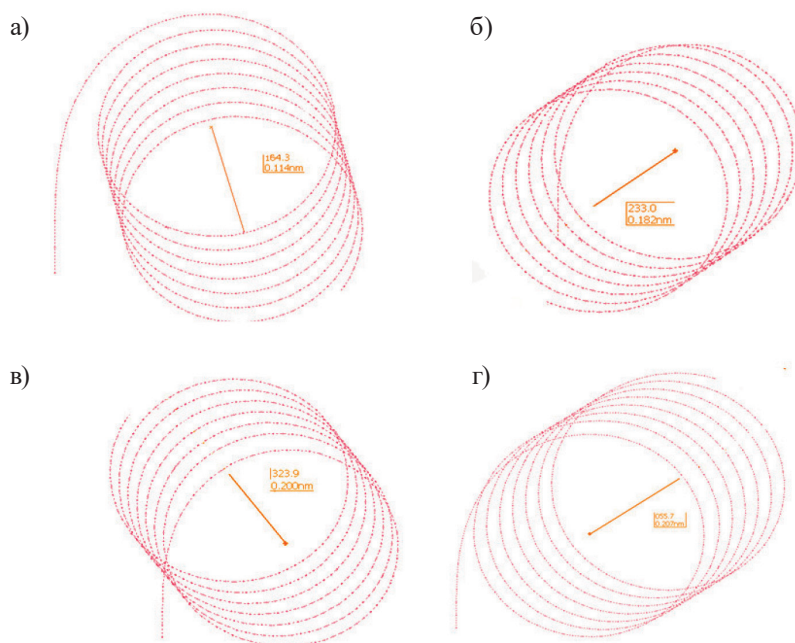


Рис. 5. Смещение циркуляции в зависимости от курсового угла ветра (20 м/с):
а — курсовой угол ветра 0° , угол перекладки руля 30° ; б — курсовой угол ветра 90° ,
угол перекладки руля 15° ; в — курсовой угол ветра 180° , угол перекладки руля 15° ;
г — курсовой угол ветра 270° , угол перекладки руля 15°

Видно, что при любом курсовом угле ветра кривая циркуляции смещается в направлении ветра под некоторым углом, противоположным углу перекладки руля. Причем величина угла смещения кривой циркуляции зависит от угла перекладки руля. В данном случае при угле перекладки руля 30° вправо кривая циркуляции смещается по направлению ветра влево на угол 15° , а при угле перекладки руля 15° она смещается на угол 35° при любом курсовом угле ветра. Эти результаты в определенной мере совпадают с выводами, сделанными в работах [1], [3] и [5], уточняя и дополняя их.

Обсуждение (Discussion)

В ходе моделирования в условиях ветрового воздействия для точек поворота на циркуляции на 90° , 180° , 270° и 360° были определены их поперечные и продольные смещения от соответствующих точек циркуляции, выполненной при отсутствии ветра. Зависимость поперечных и продольных смещений от курсового угла ветра, общий вид которой показан на рис. 2, может быть аппроксимирована полиномом четвертой степени при коэффициенте достоверности аппроксимации, превышающем 0,9. Для примера на рис. 6 показаны кривые полиномиальной аппроксимации и их уравнения, полученные с использованием обычного пакета статистического анализа программы Excel. Очевидно, что они могут быть представлены также в виде синусоидальной кривой, тем более что координата X изменяется в пределах от 0 до 360° .

Из восьми полученных координат (по две на каждую из четырех точек) при анализе результатов моделирования особый интерес с точки зрения практического применения представляют координаты, связанные с традиционными основными элементами циркуляции, а именно:

- продольное расстояние точки поворота судна на 90° , которое определяет выдвиг;
- поперечное расстояние точки поворота судна на 90° , соответствующее прямому смещению;

- поперечное расстояние точки поворота 180° , соответствующее максимальному прямому смещению (тактическому диаметру циркуляции);
- поперечное расстояние между точками поворота на 180° и 360° , которое равно диаметру установившейся циркуляции.

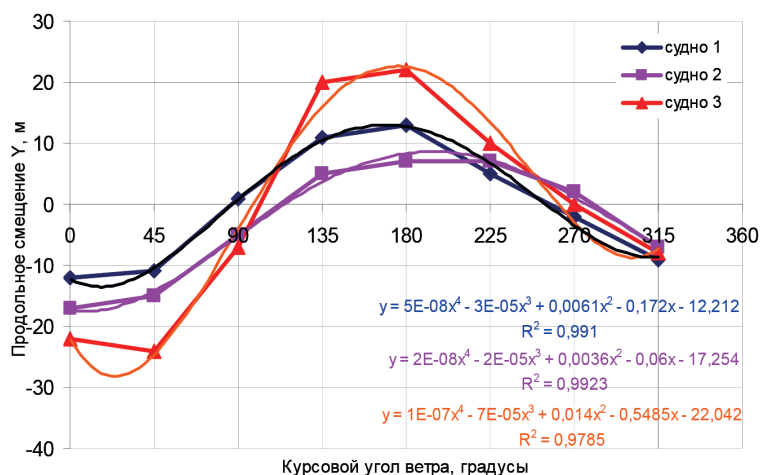


Рис. 6. Зависимость поперечного и продольного смещения точки поворота на 270° от курсового угла ветра скоростью 20 м/с

Численные значения основных элементов циркуляции для трех моделируемых судов при отсутствии ветра приведены в табл. 4.

Таблица 4

Элементы циркуляции моделируемых судов при отсутствии ветра

Моделируемые суда	Выдвиг, м	Прямое смещение, м	Тактический диаметр циркуляции, м	Диаметр установившейся циркуляции, м
Судно 1	293	176	315	243
Судно 2	507	263	483	413
Судно 3	1089	776	1417	1269

В результате анализа результатов моделирования в условиях ветрового воздействия были определены максимальные изменения основных элементов циркуляции, которые приведены в табл. 5, откуда видно, что при скорости ветра 20 м/с максимальные изменения элементов циркуляции судна 1 находятся в пределах от 3,4 до 5,7 %, судна 2 — от 1,7 до 4,2 %, судна 3 — от 1,1 до 1,8 %.

Таблица 5

Максимальные изменения основных элементов циркуляции

Моделируемые суда	Изменение элементов циркуляции при скорости ветра 20 и 40 м/с							
	Выдвиг, м		Прямое смещение, м		Тактический диаметр циркуляции, м		Диаметр установившейся циркуляции, м	
	20 м/с	40 м/с	20 м/с	40 м/с	20 м/с	40 м/с	20 м/с	40 м/с
Судно 1	10 (135°) 3,4 %	37 (270°) 12,6 %	-10 (45°) 5,7 %	32 (270°) 18,2 %	11 (315°) 3,5 %	30 (270°) 9,5 %	12 (90°) 4,9 %	56 (90°) 23,0 %
Судно 2	20 (270°) 3,9 %	18 (270°) 3,6 %	11 (180°) 4,2 %	37 (270°) 14,1 %	9 (315°) 1,7 %	37 (315°) 7,7 %	13 (90°) 3,1 %	68 (135°) 16,5 %
Судно 3	12 (225°) 1,1 %	-26 (45°) 2,4 %	-14 (45°) 1,8 %	-46 (45°) 5,9 %	18 (315°) 1,3 %	55 (315°) 3,9 %	19 (90°) 1,5 %	69 (90°) 5,4 %

Примечание. В табл. 5 в скобках показано значение курсового угла ветра, при котором наблюдалось максимальное изменение соответствующего элемента циркуляции.

Указанные процентные оценки существенно меньше данных, приведенных в работе [6]. Однако абсолютные значения таких изменений примерно соответствуют выводам, сделанным в работе [7]. Так, приведенные данные для ветра скоростью 40 м/с имеют, скорее, теоретическое значение, поскольку на практике при таком ветре суда, как правило, отстаиваются в портах на якоре. Максимальные изменения тактического диаметра циркуляции наблюдаются при курсовом угле ветра 315°, диаметра установившейся циркуляции — при курсовом угле ветра 90°. Оба этих элемента относятся к установившемуся периоду циркуляции. Для выдвиги и прямого смещения, относящихся к эволюционному периоду циркуляции, явной общей закономерности их максимальных изменений для всех трех судов в зависимости от курсового угла ветра не наблюдается. Обнаружено, что максимальные изменения прямого смещения тактического диаметра и диаметра установившейся циркуляции находятся в обратной пропорциональной зависимости от длины судна, как показано на рис. 7, где коэффициент достоверности аппроксимации линейных зависимостей находится в пределах 0,82–0,99. Этой закономерности не отмечается в отношении выдвиги, несмотря на то, что общая тенденция уменьшения влияния ветра при увеличении длины судна наблюдается.

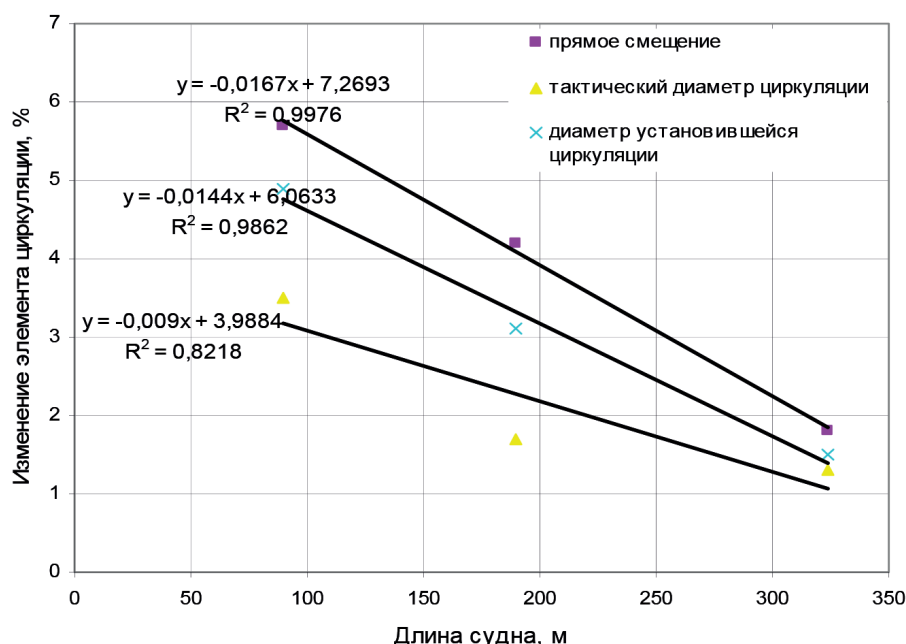


Рис. 7. Зависимость максимального изменения элементов циркуляции от длины судна

Следует особо отметить, что полученные результаты не могут быть использованы в целях каких-либо теоретических обобщений, поскольку получены с использованием только одной конкретной математической модели для трех конкретных моделей судов и, соответственно, отражают характеристики только данной математической модели и особенности этих судов. Для разработки возможных теоретических выводов и практических рекомендаций необходимо выполнение подобных исследований с использованием других сертифицированных математических моделей и проведение натурных экспериментов с реальными судами.

Заключение (Conclusion)

Сертифицированный навигационный тренажер Transas NT Pro 5.40 обеспечивает широкие возможности исследования особенностей движения судна в различных условиях плавания. Математическая модель, используемая в нем, учитывает инерцию судна, гидродинамическое, аэродинамическое и волновое воздействие, влияние работы винта, руля и подруливающих устройств, взаимодействие с другими судами, силы натяжения якорной цепи и швартовных концов, а также наличие ледовых условий.

В работе представлены результаты моделирования влияния ветра на элементы циркуляции трех судов-контейнеровозов. Определены зависимости изменений элементов циркуляции (выдвиг, прямое смещение, тактический диаметр циркуляции и диаметр установившейся циркуляции) от курсового угла ветра перед началом поворота. Поскольку такие зависимости получены впервые, в соответствии с принципом воспроизводимости научных результатов их целесообразно проверить с использованием других математических моделей или с помощью проведения натуральных экспериментов. Кроме того, целесообразно продолжить работы по моделированию в этом направлении с учетом влияния других параметров (например, скорости судна, угла перекладки руля, мелководья).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Войткунский Я. И.* Справочник по теории корабля / Я. И. Войткунский, Р. Я. Першиц, И. А. Титов. — Л.: Судостроение, 1985. — Т. 1: Судовые движители и управляемость. — 768 с.
2. *Rawson K. J.* Basic Ship Theory / K. J. Rawson, E. C. Tupper. — Fifth edition. — Oxford: Reed Educational and Professional Publishing LTD, 2001. — Vol. 2. — 731 p.
3. *Снопков В. И.* Управление судном: учебник для вузов / В. И. Снопков. — М.: Транспорт, 1991. — 359 с.
4. *Фейгин М. И.* Математическое моделирование траектории установившейся циркуляции судна при ветре / М. И. Фейгин, А. А. Попов // Вестник ВГАВТ. — 2004. — № 8. — С. 171–174.
5. *Paroka D.* Prediction of ship turning maneuvers in constant wind and regular waves / D. Paroka, A. H. Muhammad, S. Asri // International Journal of Technology. — 2017. — Is. 3. — Pp. 388–398. DOI: 10.14716/ijtech.v8i3.3704.
6. *Novaselic M.* Wind Influence on Ship Manoeuvrability — a Turning Circle Analysis / M. Novaselic, R. Mohovic, M. Baric, L. Grbić // TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — 2021. — Vol. 15. — No. 1. — Pp. 47–51. DOI: 10.12716/1001.15.01.03.
7. *Ней Зо Аунг.* Расчетное исследование управляемости и элементов мореходности судов в условиях воздействия течения, ветра и волнения: дис. ... канд. техн. наук; специальность: 05.08.01 «Теория корабля и строительная механика» / Зо Аунг Ней. — СПб.: Санкт-Петербургский государственный морской технический ун-т, 2011. — 220 с.
8. *Васильев А. В.* Управляемость судов / А. В. Васильев. — Л.: Судостроение, 1989. — 328 с.
9. *Хойер Г. Х.* Управление крупнотоннажными судами при маневрировании / Г. Х. Хойер. — М.: Транспорт, 2002. — 109 с.
10. Description of Transas mathematical model. — SPb.: Transas LTD, 2011. — 86 p.

REFERENCES

1. *Voitkunsii, Ya. I., R. Ya. Pershits, and I. A. Titov.* *Spravochnik po teorii korablya*. Vol. 1. L.: Sudostroenie, 1985.
2. *Rawson, K. J., and E. C. Tupper.* *Basic Ship Theory*. Fifth edition. Volume 2. Oxford: Reed Educational and Professional Publishing LTD, 2021
3. *Snopkov, V. I.* *Upravlenie sudnom*. M.: "Transport", 1991.
4. *Feigin, M. I., and A. A. Popov.* "Matematicheskoe modelirovanie traektorii ustanovivshetsya cirkulyacii sudna pri vetre." *Vestnik VGAVT* 8 (2004): 171–174.
5. *Paroka, Daeng, Andi Haris Muhammad, and Syamsul Asri.* "Prediction of ship turning maneuvers in constant wind and regular waves." *International Journal of Technology* 3 (2017): 388–398. DOI: 10.14716/ijtech.v8i3.3704
6. *Novaselic, M., R. Mohovic, M. Baric, and L. Grbić.* "Wind Influence on Ship Manoeuvrability — a Turning Circle Analysis." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 15.1 (2021): 47–51. DOI: 10.12716/1001.15.01.03
7. *Ney Zo Aung.* *Raschetnoe Issledovanie upravlyaemosti i elementov morechodnosti sudov v usloviyakh vozdeystviya techeniya vetra i vilneniya*. PhD diss. SPb.: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyi morskoyi tehnikeskii universitet, 2011.
8. *Vasiljev, A. S.* *Upravlyatmocht sudov*. L.: Sudostroenie, 1983.
9. *Hoyer, H. H.* *Upravlenie krupnotonnazhnymi sudami pri manevrirovanii*. M.: Transport, 2002.
10. *Description of Transas mathematical model*. SPb.: Transas LTD, 2011.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Аносов Алексей Николаевич — аспирант

Научный руководитель:

Лентарёв Александр Андреевич

МГУ им. адм. Г. И. Невельского

690003, Российская Федерация,

Владивосток,

ул. Верхнепортовая, 50а

e-mail: anosovan@msun.ru

Лентарёв Александр Андреевич —

доктор технических наук, доцент,

старший научный сотрудник

МГУ им. адм. Г. И. Невельского

690003, Российская Федерация,

Владивосток,

ул. Верхнепортовая, 50а

e-mail: lentarev@msun.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anosov, Alexey A. — Postgraduate

Supervisor:

Lentarev, Alexander A.

Maritime State University named after

Admiral G. I. Nevelskoy

50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,

Russian Federation

e-mail: anosovan@msun.ru

Lentarev, Alexander A. —

Dr. of Technical Sciences, associate professor,

senior researcher

Maritime State University named

after Admiral G. I. Nevelskoy

50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,

Russian Federation

e-mail: lentarev@msun.ru

Статья поступила в редакцию 3 апреля 2023 г.

Received: April 3, 2023.

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-579-588

CURRENT FREQUENCY VARIATION TRENDS OF DANGEROUS WINDS IN THE EASTERN SECTOR OF THE RUSSIAN ARCTIC

S. A. Podporin¹, A. V. Kholoptsev^{1,2}

¹ — Sevastopol branch of FSBI “N. N. Zubov’s State Oceanographic Institute”,
Sevastopol, Russian Federation

² — Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

The article aim is to identify mean values and change trends in the frequency of winds that pose a danger to navigation on shipping routes of the Laptev and East Siberian Seas which became evident in 2010–2021 period. In the period under review the winds were considered dangerous if their average hourly speed over the water surface at 10 m altitude exceeded 15 m/s. The factual material is based on information from the ERA5 global reanalysis. The research methodology involves the use of standard methods of mathematical statistics. A comparative analysis of the last two 12-year periods (1998–2009 and 2010–2021) has shown that the climate changes that happened in 2010–2021 significantly affected the wind regime of the studied region, which had consequences for shipping. In August, a significant decrease in the frequency of dangerous winds was recorded in the region, which generally contributed to the improvement of navigation safety by reducing storm risks. Opposite trends manifested themselves from September to December, which led to increased storm surge and a rise in the likelihood of ships icing, especially on the high-latitude paths of the Northern Sea Route and approaches to the Long Strait. The decrease in the frequency of winds, revealed in January and April, contributed to the preservation of a stable ice cover and stable difficult navigation conditions in these months. The persistence of the identified trends in interannual changes in the wind regime in the region under consideration in the future is not guaranteed. Therefore, the development of the existing network of Arctic weather stations remains an urgent problem for shipping.

Keywords: Laptev Sea, East Siberian Sea, shipping, Northern Sea Route, navigational risk, wind, frequency, trend.

For citation:

Podporin, Sergey A., and Aleksandr V. Kholoptsev. “Current frequency variation trends of dangerous winds in the Eastern sector of the Russian Arctic.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 579–588. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-579-588.

УДК 656.61.052: 551.583

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ПОВТОРЯЕМОСТИ ОПАСНЫХ ВЕТРОВ В ВОСТОЧНОМ СЕКТОРЕ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

С. А. Подпорин¹, А. В. Холопцев^{1,2}

¹ — Севастопольское отделение ФГБУ «Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова», Севастополь, Российская Федерация

² — ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
Севастополь, Российская Федерация

Целью статьи является выявление средних значений и тенденций изменения повторяемости ветров, представляющих опасность для судоходства в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском, наблюдающихся в период 2010–2021 гг. В работе отмечается, что опасными в рассматриваемый период являлись ветры, среднечасовая скорость которых на высоте 10 м над водной поверхностью превышала 11 м/с. В качестве фактического материала использованы данные глобального реанализа ERA5. Методика проведенного исследования предполагала использование стандартных методов математической статистики. Сравнительный анализ двух последних 12-летних периодов: 1998–2009 гг. и 2010–2021 гг., показал, что произошедшие в 2010–2021 гг. климатические изменения оказали существенное влияние на ветровой режим изучаемого региона, что имело последствия для судоходства. В эти периоды

в августе в регионе зафиксировано значительное уменьшение повторяемости опасных ветров, что в целом способствовало повышению безопасности плавания за счет снижения штормовых рисков. Проявившиеся обратные тенденции с сентября по декабрь были выражены в усилении штормового волнения и повышении вероятности обледенения судов, особенно на высокоширотных трассах Северного морского пути и подходах к проливу Лонга. Снижение повторяемости ветров, выявленное в январе и апреле, способствовало сохранению устойчивого ледяного покрова и стабильно сложных условий судоходства в эти месяцы. Отмечается, что сохранение устойчивости выявленных тенденций межгодовых изменений ветрового режима в рассматриваемом регионе в будущем не гарантировано, поэтому развитие существующей в нем наблюдательной сети по-прежнему является актуальной проблемой гидрометеорологического обеспечения осуществляемого этом районе судоходства.

Ключевые слова: море Лаптевых, Восточно-Сибирское море, Северный морской путь, судоходство, навигационный риск, ветер, повторяемость, тенденция.

Для цитирования:

Подпорин С. А. Современные тенденции изменения повторяемости опасных ветров в восточном секторе Российской Арктики / С. А. Подпорин, А. В. Холопцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 579–588. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-579-588.

Введение (Introduction)

Для морей восточного сектора Арктики в любые сезоны характерны сложные ледовые условия. Одним из основных факторов, оказывающих значительное влияние на состояние ледяного покрова и условия судоходства в этом регионе, является ветровой режим, вызывающий дрейф льда и образование полыней. В этой связи выявление современных тенденций его изменения на участках морей, по которым проходят судоходные маршруты, является актуальной проблемой гидрометеорологии, океанографии и эксплуатации арктического морского транспорта.

Наибольший интерес решение указанной проблемы представляет для участков трасс Северного морского пути (далее — СМП), на которых в современном периоде ледовые условия в любые месяцы характеризуются повышенной сложностью, а гидрографическое и гидрометеорологическое обеспечение судоходства является недостаточным. Многие из таких участков расположены на акваториях морей Лаптевых и Восточно-Сибирского [1]. Судоходство в этих районах ограничено в основном летне-осенним сезоном — периодом, во время которого открывается *навигационное окно* для Северного завоза, активно выполняются транзитные и научные рейсы [2]. Интерес к региону дополнительно обусловлен наличием на его шельфе перспективных нефтегазоносных районов, таких как Притаймырский, Хатангский, Усть-Оленекский, Усть-Ленский и Восточно-Сибирский [3].

В условиях наблюдающегося потепления климата Арктики [4] перспективным направлением развития арктического флота, прежде всего танкерного и СПГ, является расширение временных рамок навигационного периода [5]. Сокращение площади ледяного покрова в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском пока не столь заметно, как в Баренцевом и Карском морях [6]. Более того, в отдельных районах (в частности, в районе Новосибирских островов) в течение последнего десятилетия отмечалось даже некоторое усложнение ледовых условий [5], [7]. Тем не менее в целом в современном климатическом периоде устойчивая тенденция к сокращению ледовитости Арктики существует [8]. На ее основе в ряде работ (например, [9]) даны прогнозы открытия арктических судоходных маршрутов (включая трансполярные) уже к середине XXI в. Сокращение ледяного покрова арктических морей приводит к усилению влияния этих изменений и их ветрового режима на безопасность судоходства.

В месяцы с июля по октябрь, когда в сезонных изменениях площади чистой воды в морях восточной Арктики наблюдается максимум, следствием увеличения повторяемости сильных ветров является усиление поверхностного волнения и прибоя, разрушающего берега и портовые сооружения. В остальные месяцы, когда на акваториях присутствует устойчивый ледяной покров, ветровой режим может менять динамику дрейфа льда, приводить к его сжатию и торошению, способствовать образованию полыней или, наоборот, их закрытию.

Особенности ветрового режима морей Лаптевых и Восточно-Сибирского описаны в лоциях и специализированных справочниках [10], [11], которые, однако, не отражают в полной мере динамику происходящих в настоящее время климатических изменений. Некоторые закономерности изменения ветрового режима этих морей рассмотрены в работах [12]–[14]. В работе [15] описаны тенденции изменения повторяемости ветров на трассах прибрежного маршрута СМП. Представлены результаты для ветров северных румбов для летне-осеннего навигационного периода (июль–октябрь), выявлены потенциально опасные для судоходства районы, расположенные в основном в Баренцевом, Карском и Чукотском морях. На прибрежных трассах СМП в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском, напротив, опасных тенденций не выявлено. Особенности произошедших в период 2010–2019 гг. изменений атмосферной циркуляции в летние сезоны в рассматриваемом регионе описаны также в работе [16]. Тем не менее современный ветровой режим для остальных месяцев и районов морей Восточного сектора арктического шельфа и его влияние на судоходство остаются недостаточно изученными.

Целью настоящей работы является оценка современных значений средней повторяемости опасных ветров на судоходных трассах морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, а также выявление статистически значимых тенденций изменений этого показателя, проявившихся за последние 12 лет.

Достижение поставленной цели предполагает решение следующих задач:

- оценка и сравнительный анализ среднемесячных значений средней повторяемости опасных ветров в указанных морях за два последних 12-летних периода: 1998–2009 и 2010–2021 гг.
- выявление участков акваторий, на которых в последнем 12-летнем периоде присутствуют значимые тенденции к изменению данного показателя.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Опасными считаются ветры со средней скоростью более 11 м/с (6 баллов по шкале Бофорта или «сильный» ветер). При таком ветре на чистой воде средняя высота волн составляет не менее 3 м, максимальная — не менее 4,5 м¹. При наличии ледяного покрова такие ветры способны вызывать значительный дрейф льда и активизировать связанные с этим опасные природные явления. В качестве характеристики повторяемости опасного ветра (далее — ПОВ) в конкретном месяце принято количество относящихся к нему часов, в течение которых среднечасовая скорость ветра составляла не менее 11 м/с.

При решении первой задачи для всех месяцев и участков акваторий морей Лаптевых и Восточно-Сибирского определялись среднемесячные значения ПОВ, которые впоследствии усреднялись за периоды 1998–2009 и 2010–2021 гг. В рамках решения второй задачи были выявлены участки морей, на которых тенденции межгодовых изменений ПОВ в период 2010–2021 гг. принимались статистически значимыми с вероятностью не ниже 0,9.

В качестве характеристики тенденции рассматривалось значение углового коэффициента линейного тренда (далее — УКЛТ) соответствующего временного ряда. При оценке вероятности того, что тенденция межгодовых изменений ПОВ, выявленная для некоторого участка и месяца, является значимой, предполагалось, что последние могут быть описаны математической моделью:

$$Y_k = AT_k + G_k + C, \quad (1)$$

где A — оценка по методу наименьших квадратов значения УКЛТ процесса Y_k (k — номер члена отрезка временного ряда Y , учитываемого при вычислении A ; $k = 1, 2, \dots, k_{\max}$);

T_k — продолжительность интервала времени, отделяющего от начала изучаемого отрезка член временного ряда с номером k (при $k = 1$ $T_k = 0$);

G_k — выборочное значение из реализации нормального случайного процесса с нулевым средним и среднеквадратическим отклонениями S , соответствующее некоторому k ;

C — постоянная составляющая (действительная константа).

¹ Шкала Бофорта — сила ветра и состояние моря. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.vodkomotornik.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=15&Itemid=15 (дата обращения: 01.02.2023).

Решение о значимости A с вероятностью 0,9 принималось в случае, если выполнялось условие

$$|AT_k| > 1,3S, \quad (2)$$

где $|AT_k|$ — абсолютная величина.

При оценке тенденций изменений ПОВ в 2010–2021 гг. $k_{\max}$ принималось равным двенадцати. В качестве фактического материала использована информация о распределении среднечасовых значений меридиональной и зональной составляющих скорости ветра в изучаемом регионе, представленная в базе данных реанализа ERA5, поддерживаемого европейской службой Copernicus Marine Service¹. Реанализ ERA5 основан на усовершенствованных климатических моделях [17], разработанных для условий ограниченности данных физических измерений. Содержащиеся в нем данные применялись для вычисления значений модуля среднечасовой скорости ветра на высоте 10 м над земной поверхностью. На основе результатов этих вычислений были сформированы временные ряды, члены которых представляли собой значения модуля среднечасовой скорости ветра для каждого часа за периоды 00.01.1998–23.31.2009 и 00.01.2010–23.31.2021 для всех узлов координатной сетки с разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Полученные результаты для наглядности наносились на контурную карту региона.

Результаты исследования и их анализ (Research Results And Analysis)

Средние значения ПОВ в изучаемом регионе, определенные за каждый месяц периодов 1998–2009 гг. и 2010–2021 гг. в рамках решения первой задачи, представлены на рис. 1 и 2 соответственно.

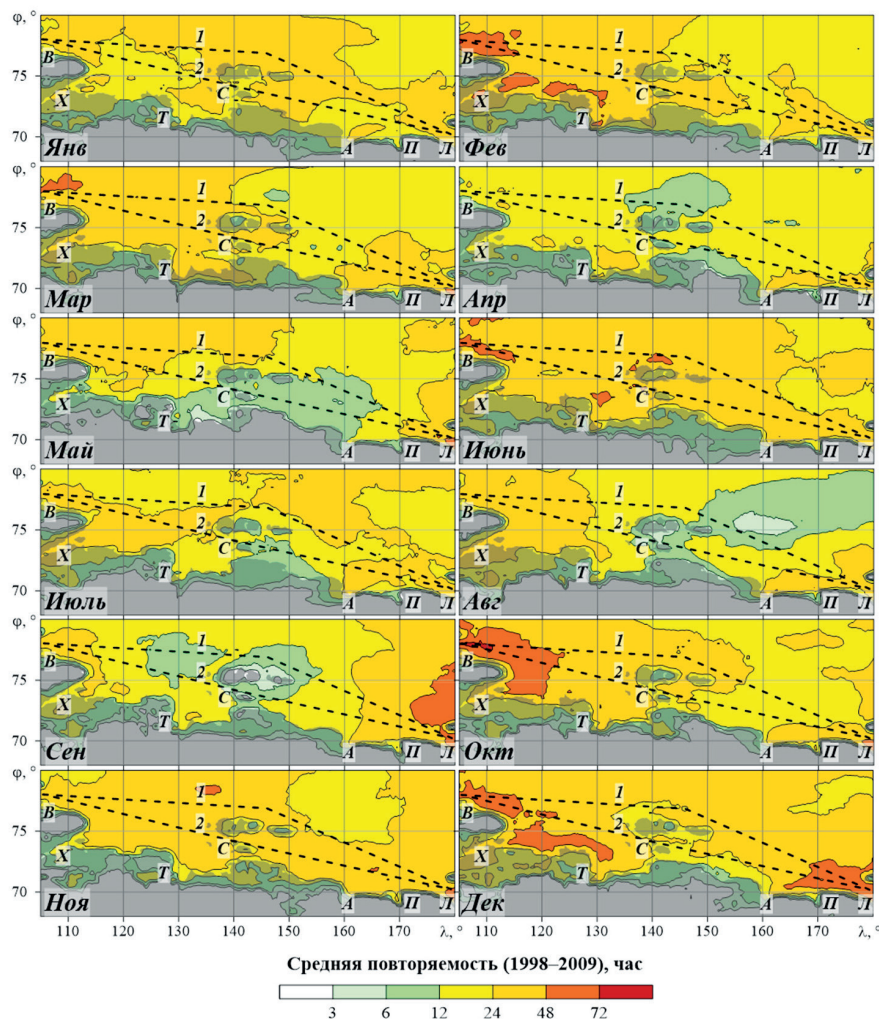


Рис. 1. Распределение средних значений ПОВ в периоде 1998–2009 гг.

¹ База данных реанализа ERA5 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form> (дата обращения: 01.02.2023).

Штриховыми линиями на картах схематично обозначены высокоширотный 1 и низкоширотный 2 транзитные маршруты СМП. Маршрут 1 огибает архипелаг Новосибирские острова с севера, маршрут 2 проходит через пролив Санникова. Также для удобства ориентировки заглавными буквами обозначены важные для каботажных перевозок и Северного завоза районы изучаемого региона: В — пролив Вилькицкого; Х — Хатангский залив; Т — подходы к порту Тикси; А — бухта Амбарчик (устье реки Колымы); П — подходы к порту Певек; Л — пролив Лонга.

Как видно из рис. 1, среднемесячная ПОВ в изучаемом регионе в 1998–2009 гг. в основном не выходила за пределы 48 ч. Исключение составляли некоторые западные районы моря Лаптевых (В, Х, Т) в феврале, октябре, декабре и частично июне, где ПОВ была более 48 ч, но не превышала 72 ч. В восточной части Восточно-Сибирского моря и на подходах к проливу Лонга (районы П и Л) в сентябре и декабре также были выявлены повышенные ПОВ (48–72 ч). Наиболее «спокойными» месяцами были апрель, май, август и сентябрь. В целом средняя ПОВ в море Лаптевых была несколько выше, чем в Восточно-Сибирском. Полученные данные достаточно хорошо согласуются с описанием ветрового режима морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, представленным в [10], [11].

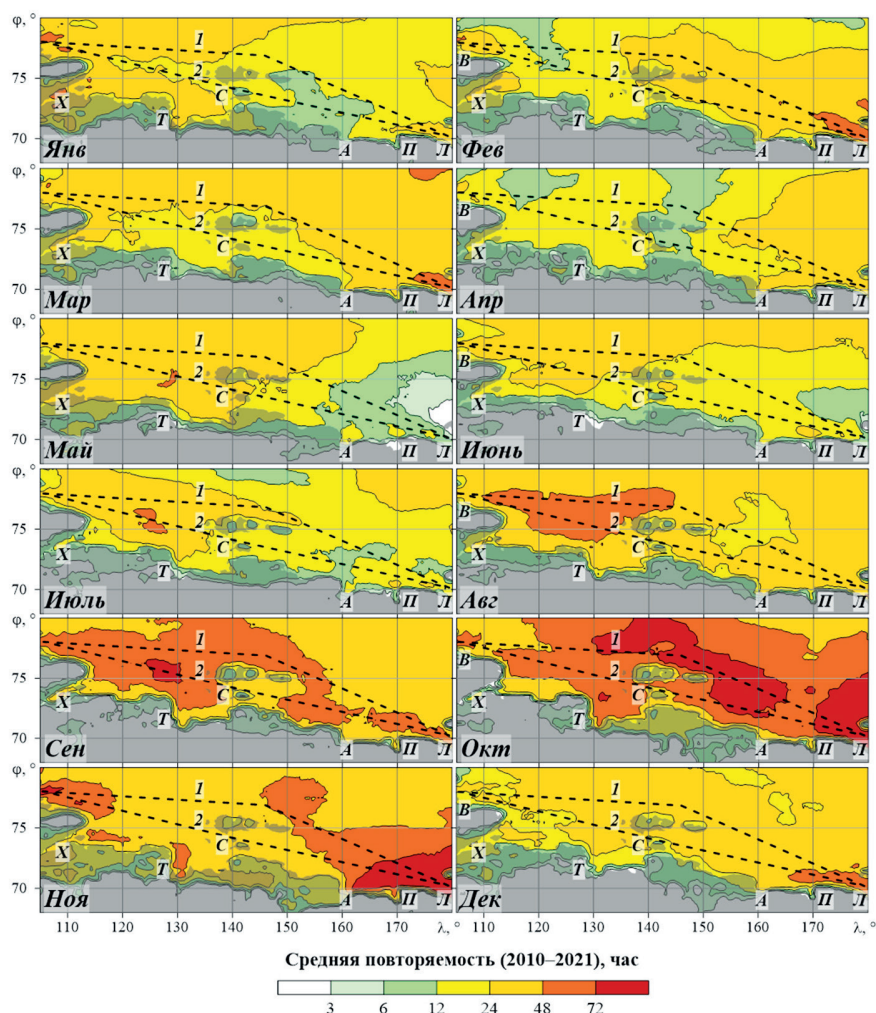


Рис. 2. Распределение средних значений повторяемости опасных ветров в период 2010–2021 гг.

За период 2010–2021 гг., как следует из рис. 2, ветровые режимы изучаемых морей претерпели изменения. Опасные ветры стали наблюдаться чаще в осенние месяцы. Ветровая обстановка ухудшилась в период активной навигации, когда ледовитость морей является минимальной (сентябрь, октябрь). Появились участки с ПОВ, превышающей 72 ч. Наибольшее их количество выявлено в октябре на высокоширотном маршруте СМП к северу, западу и востоку от архипелага Новосибирские

острова, а также в восточной части Восточно-Сибирского моря, так как в этом месяце происходит переход температур в зону отрицательных значений, и, следовательно, возрастают навигационные риски, связанные как с усиливающимся волнением, так и с обледенением судов.

Ситуация заметно усложнилась также в ноябре в восточной части Восточно-Сибирского моря и особенно на подходах к проливу Лонга. В этом месяце происходит активное ледообразование, неустойчивые скопления дрейфующего молодого льда под действием сильного ветра могут выноситься непосредственно на маршруты движения судов, создавая препятствия судоходству. В остальные месяцы средняя ПОВ в 2010–2021 гг., по сравнению с 1998–2009 гг., либо изменилась незначительно, либо несколько уменьшилась (январь, май).

В результате решения второй задачи была выполнена оценка статистически значимых (с вероятностью не менее 0,9) тенденций изменения ПОВ, проявившихся в 2010–2021 гг. Полученные результаты представлены на рис. 3 в виде карт распределения значений УКЛТ межгодовых изменений ПОВ в акватории изучаемого региона.

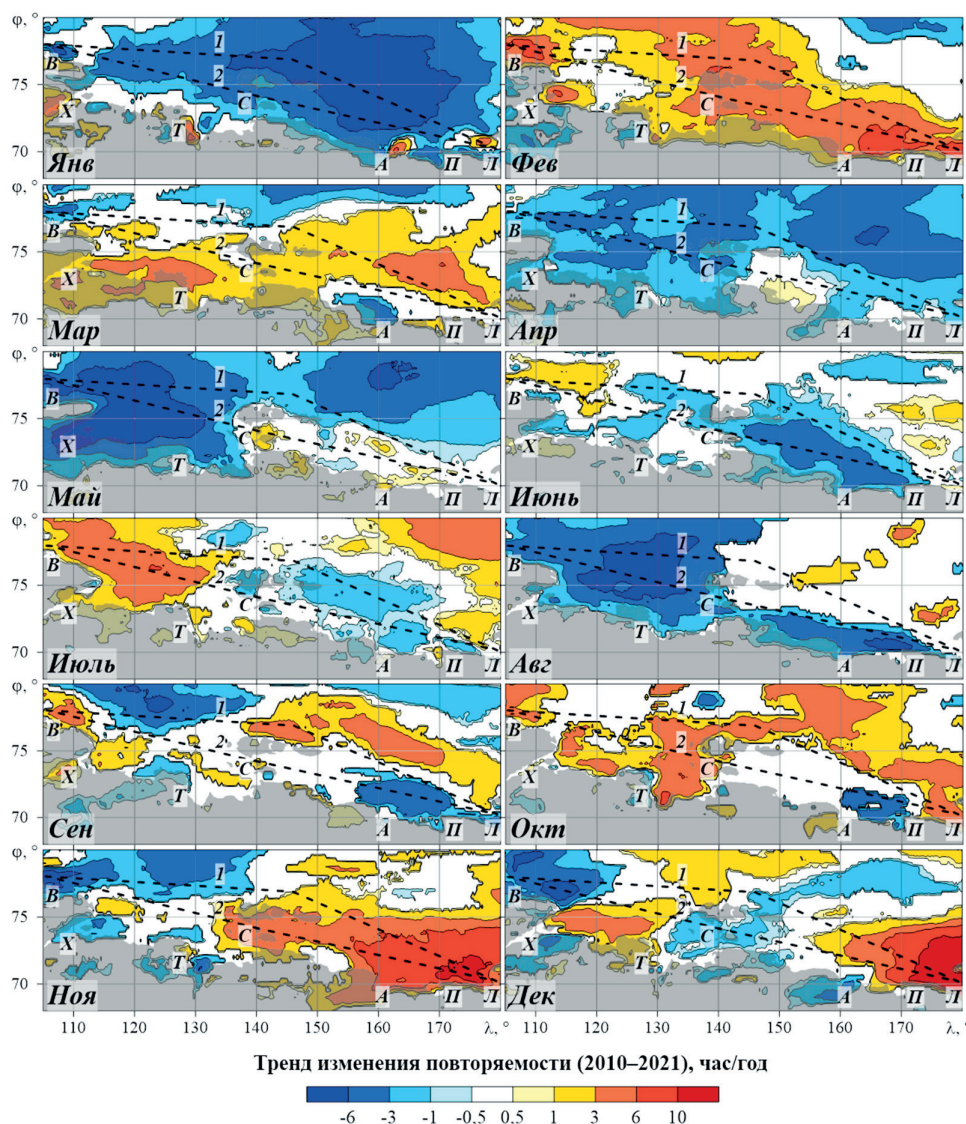


Рис. 3. Тенденции изменения ПОВ в море Лаптевых и Восточносибирском море в период 2010–2021 гг.

Как видно из рис. 3, происходящие в различные месяцы изменения ПОВ во многих районах изучаемых морей являются разнонаправленными. В январе проявляется ярко выраженный тренд к снижению этого показателя во всем изучаемом регионе. В феврале, напротив, в большинстве рай-

онов имеет место возрастающий тренд (значения более 6 ч/год выявлены в районах В, Х, С, А, П, Л). В марте возрастающий тренд сохраняется, хотя он менее выраженный. Сильнее всего он проявился в районах Х, Т, П, Л. В северных районах изучаемых морей при этом ПОВ убывает. В апреле и мае, как и в январе, проявляется ярко выраженный тренд к снижению ПОВ во всем изучаемом регионе.

В июне повторяемость опасных ветров снижается в юго-западной части Восточно-Сибирского моря (районы С, А, П) и локально в море Лаптевых (центральная часть, а также районы Х и Т). К северо-востоку от полуострова Таймыр при этом выявлен небольшой возрастающий тренд. В июле в море Лаптевых (за исключением восточной части) ПОВ заметно возрастает, а в Восточно-Сибирском в центральной и прибрежной его частях убывает, увеличиваясь при этом на севере и незначительно на востоке. В августе во всем море Лаптевых и прибрежной части Восточно-Сибирского выявлены явные тренды на убывание этого показателя.

Сентябрь характеризуется разнонаправленными трендами в разных районах изучаемых морей: убывающий тренд зафиксирован в районах Т, А, П; возрастающий — к северу от Новосибирских островов, в центральной части Восточно-Сибирского моря, а также районах В и Х. В октябре проявляются преимущественно возрастающие тренды ПОВ в большинстве районов изучаемого региона. Наиболее ярко они выражены к западу и северу от Новосибирских островов, северной части Восточно-Сибирского моря, а также районах В, Х, Т, С, Л. Убывающий тренд проявился локально в районах А и П. В ноябре в большинстве районов моря Лаптевых в межгодовых изменениях ПОВ проявляется значимая тенденция к снижению, наиболее заметная в проливе Вилькицкого (район В), а также северной части моря. В Восточно-Сибирского моря, напротив, имеет место противоположная тенденция, особо выраженная на подходах к проливу Лонга, а также в центральной части моря. В декабре значительный возрастающий тренд сохранился и даже несколько усилился в восточной части Восточно-Сибирского моря, а также юго-западной и центральной частях моря Лаптевых. Яркий выраженный тренд на уменьшение ПОВ проявился в северо-западной части моря Лаптевых, в районе С и северной части Восточно-Сибирского моря.

Анализ полученных результатов показывает, что увеличение ПОВ, зафиксированное в сентябре и октябре, в целом осложняет условия судоходства в регионе. Поскольку в эти месяцы преобладают ветры северных румбов, такой процесс повышает вероятность выноса дрейфующих льдов из северных районов моря на судоходные трассы. Поскольку стационарный ледяной покров в эти месяцы отсутствует, то возрастают также риски возникновения штормов и обледенения судов. При этом наибольшим рискам подвержены участки высокоширотного маршрута СМП в северной и центральной частях Восточно-Сибирского моря.

Тенденция к уменьшению ПОВ, выявленная в августе в большинстве районов моря Лаптевых и на прибрежных участках Восточно-Сибирского, напротив, свидетельствует о повышении безопасности навигации и увеличении допустимой скорости движения судов на прибрежном маршруте СМП (на участках, где глубины для крупнотоннажных судов достаточно велики).

Выявленное в январе и апреле уменьшение ПОВ способствует сохранению устойчивого ледяного покрова и стабильно сложных условий судоходства. Поскольку в эти месяцы в изучаемом регионе преобладают ветры южных румбов, способные отжимать дрейфующий лед от припая, можно предположить, что в 2010–2021 гг. значимого увеличения площадей заприпайных полыней, которое имело место в 1993–2009 гг. [18], не происходило.

Увеличение ПОВ в феврале и марте, выявленное в 2010–2021 гг., благоприятствует увеличению здесь размеров заприпайных полыней. Это позволяет допускать возможность прокладки по некоторым из них маршрутов судов с высоким арктическим ледовым классом (типа «Ямалмакс» и аналогичных) [19].

Обсуждение полученных результатов (Discussion of the Results Obtained)

Полученные результаты в полной мере соответствуют существующим представлениям о переменах ветрового режима арктических морей, которые произошли в период современного потепления климата [12]–[14]. Наряду с другими морями такие перемены заметно проявились в морях Лаптевых

и Восточно-Сибирском. Новыми фактами, установленными в настоящей работе, являются оценки средних значений ПОВ и тенденции их изменения для различных месяцев и участков трасс СМП, соответствующие периоду 2010–2021 гг. Полученные результаты подтверждают справедливость представлений о том, что в месяцы активного ледообразования (ноябрь и декабрь), когда ледяной покров неустойчив и представлен в основном молодым льдом, навигация судов с высоким ледовым классом в восточном секторе СМП возможна. Она может быть также сравнительно безопасной, если выявленные тенденции к увеличению ПОВ в эти месяцы сохранятся и в будущем.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Происходящие климатические изменения оказывают существенное влияние на ветровой режим морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, а также условия судоходства в них. Темпы этих изменений в 2010–2021 гг. повысились.
2. Тенденции к улучшению условий судоходства отмечаются в августе, феврале и марте. Уменьшение повторяемости опасных ветров в августе приводит к снижению штормовых рисков. Увеличение этого показателя, выявленное в феврале и марте, способствует увеличению размеров заприпайных полыней.
3. Тенденции к ухудшению условий судоходства проявились с сентября по декабрь. Значимое увеличение ПОВ, выявленное в эти месяцы, повышает штормовые риски и опасность обледенения, особенно на высокоширотной трассе Северного морского пути и подходах к проливу Лонга. Выявленное в январе и апреле значимое снижение ПОВ над многими частями акватории изучаемого региона способствует сохранению в них устойчивого ледяного покрова и стабильно сложных условий судоходства.
4. Сохранение устойчивости выявленных тенденций межгодовых изменений ветрового режима в рассматриваемом регионе в будущем не гарантировано, поэтому развитие существующей в нем наблюдательной сети остается актуальной проблемой гидрометеорологического обеспечения осуществляемого здесь судоходства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шаронов А. Ю. Задачи гидрометеорологического обеспечения круглогодичной навигации в Восточно-Сибирском море / А. Ю. Шаронов, В. А. Шматков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 170–182. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-170-182.
2. Тезиков А. Л. Исследование факторов, влияющих на продолжительность навигации в акватории Северного морского пути / А. Л. Тезиков, Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 734–744. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-734-744.
3. Григорьев Г. А. Перспективы освоения углеводородных ресурсов российского арктического шельфа — стратегическая пауза неизбежна / Г. А. Григорьев // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. — 2019. — № 2 (165). — С. 37–45.
4. Моря Российской Арктики в современных климатических условиях / под ред. И. М. Ашика. — СПб.: Изд. ААНИИ, 2021. — 360 с.
5. Холопцев А. В. Перспективы безледокольной навигации судов класса Arc7 в районе Новосибирских островов в зимний период / А. В. Холопцев, С. А. Подпорин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 867–879. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-867-879.
6. Думанская И. О. Ледовые условия морей азиатской части России / И. О. Думанская. — М.: Обнинск: ИГ – СОЦИН, 2017. — 640 с.
7. Холопцев А. В. Анализ изменений ледовых условий на Северном морском пути в конце XX — начале XXI века / А. В. Холопцев, С. А. Подпорин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 71–84. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-71-84.

8. Yadav J. Dramatic decline of Arctic sea ice linked to global warming / J. Yadav, A. Kumar, R. Mohan // *Natural Hazards*. — 2020. — Vol. 103. — Pp. 2617–2621. DOI: 10.1007/s11069-020-04064-y
9. Aksenov Y. On the Future Navigability of Arctic Sea Routes: High-resolution Projections of the Arctic Ocean and Sea Ice / Y. Aksenov, E. E. Popova, A. Yool, A. G. Nurser, T. D. Williams, L. Bertino, J. Bergh // *Marine Policy*. — 2017. — Vol. 75. — Pp. 300–317. DOI: 10.1016/j.marpol.2015.12.027.
10. Pub. 183 (Enroute). Sailing Directions. North Coast of Russia. — Springfield, Virginia: National Geospatial-Intelligence Agency, 2021. — 188 p.
11. Зонн И. С. Восточно-Сибирское море: энциклопедия / И. С. Зонн, А. Г. Костяной, А. В. Семенов; под ред. акад. РАН Г. Г. Матишова. — М.: Междунар. отношения, 2014. — 173 с.
12. Алексеев Г. В. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике / Г. В. Алексеев // *Фундаментальная и прикладная климатология*. — 2015. — Т. 1. — С. 11–26.
13. Катцов В. М. Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики / В. М. Катцов, Б. Н. Порфирьев // *Арктика: экология и экономика*. — 2012. — № 2 (6). — С. 066–079.
14. Мохов И. И. Особенности современных изменений климата в Арктике и их последствий / И. И. Мохов // *Проблемы Арктики и Антарктики*. — 2020. — Т. 66. — С. 446–462. DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-4-446-462.
15. Холопцев А. В. Участки Северного морского пути с наибольшей повторяемостью ветров северных румбов в XXI веке / А. В. Холопцев, С. А. Подпорин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 305–314. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-305-314.
16. Kholoptsev A. V. Meridional components of atmospheric circulation and Arctic ice cover in summer / A. V. Kholoptsev, S. A. Podporin // *Russian Meteorology and Hydrology*. — 2021. — No. 6. — Pp. 372–378. DOI: 10.3103/S1068373921060030.
17. Hoffmann L. From ERA-Interim to ERA5: the considerable impact of ECMWF's next-generation reanalysis on Lagrangian transport simulations / L. Hoffmann, G. Günther, D. Li, O. Stein, X. Wu, S. Griessbach, Y. Heng, P. Konopka, R. Müller, B. Vogel, J. S. Wright // *Atmospheric Chemistry and Physics*. — 2019. — Vol. 19. — Is. 5. — Pp. 3097–3124. DOI: 10.5194/acp-19-3097-2019.
18. Карелин И. Д. Припай и заприпайные полыньи арктических морей сибирского шельфа в конце XX — начале XXI века / И. Д. Карелин, В. П. Карклин. — СПб.: ААНИИ, 2012. — 180 с.
19. Исаулова К. Я. Исследование навигационно-гидрографических характеристик заприпайных полыней восточного сектора Северного морского пути / К. Я. Исаулова // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 394–402. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-394-402.

REFERENCES

1. Sharonov, Andrei Yu., and Vladimir A. Shmatkov. “The problem of hydrometeorological maintenance of year-round navigation in the East Siberian Sea.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.1 (2018): 170–182. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-170-182.
2. Tezиков, Aleksandr L., and Evgeniy O. Ol'khovik. “Studying the factors affecting the duration of navigation in the Northern Sea Route water area.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 734–744. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-734-744.
3. Grigoriev, G. A. “Prospects for the development of hydrocarbon resources of the Russian Arctic shelf — a strategic pause is inevitable.” *Mineral'nyye resursy Rossii. Ekonomika i upravleniye* 2(165) (2019): 37–45.
4. Ashik I. M., ed. *Morya Rossiyskoy Arktiki v sovremennykh klimaticheskikh usloviyakh*. SPb.: AANII, 2021.
5. Kholoptsev, Aleksandr V., and Sergey A. Podporin. “Prospects for unescorted navigation of arc7 ice-class vessels in the region of the new Siberian islands during the winter period.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 867–879. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-867-879.
6. Dumanskaya, I. O. *Ledovye usloviya morei aziatskoi chasti Rossii*. M.: Obninsk: IG – SOTSIN, 2017.
7. Kholoptsev, Aleksandr V., and Sergey A. Podporin. “Analysis of ice situation changes on the Northern Sea Route in the late XX — early XXI century.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 71–84. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-71-84.
8. Yadav, Juhi, Avinash Kumar, and Rahul Mohan. “Dramatic decline of Arctic sea ice linked to global warming.” *Natural Hazards* 103 (2020): 2617–2621. DOI: 10.1007/s11069-020-04064-y.

9. Aksenov, Yevgeny, E. E. Popova, A. Yool. A. J. G. Nurser, Timothy D. Williams, Laurent Bertino, and Jon Berg. "On the Future Navigability of Arctic Sea Routes: High-resolution Projections of the Arctic Ocean and Sea Ice." *Marine Policy* 75 (2017): 300–317. DOI: 10.1016/j.marpol.2015.12.027.
10. *Pub. 183 (Enroute). Sailing Directions. North Coast of Russia*. Springfield, Virginia: National Geospatial-Intelligence Agency, 2021.
11. Zonn, I. S., A. G. Kostyanov, and A. V. Semenov. *Vostochno-Sibirskoe more: entsiklopediya*. Edited by G. G. Matishov. M.: Mezhdunar. otnosheniya, 2014.
12. Alekseev, G. V. "Development and amplification of global warming in the Arctic." *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya* 1 (2015): 11–26.
13. Kattsov, Vladimir M., and Boris N. Porfir'yev "Climate change in the Arctic: consequences for the environment and the economy." *Arctic: ecology and economy* 2(6) (2012): 066–079.
14. Mokhov, Igor I. "Features of modern climate change in the Arctic and their consequences." *Arctic and Antarctic Research* 66 (2020): 446–462. DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-4-446-462.
15. Kholoptsev, Aleksandr V., and Sergey A. Podporin. "Areas of the Northern Sea Route with the highest frequency of the northern winds in the XXI century." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 305–314. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-305-314.
16. Kholoptsev, A. V., and S. A. Podporin. "Meridional components of atmospheric circulation and Arctic ice cover in summer." *Russian Meteorology and Hydrology* 46 (2021): 372–378. DOI: 10.3103/S1068373921060030.
17. Hoffmann, Lars, Gebhard Günther, Dan Li, Olaf Stein, Xue Wu, Sabine Griessbach, Yi Heng, Paul Konopka, Rolf Müller, Bärbel Vogel, and Jonathon S. Wright. "From ERA-Interim to ERA5: the considerable impact of ECMWF's next-generation reanalysis on Lagrangian transport simulations." *Atmospheric Chemistry and Physics* 19.5 (2019): 3097–3124. DOI: 10.5194/acp-19-3097-2019.
18. Karelin, I. D., and V. P. Karklin. *Pripyat i zapripyaynyye polyn'i arkticheskikh morey sibirskogo shel'fa v kontse XX — nachale XXI veka*. SPb.: AANII, 2012.
19. Isaulova, Kristina Ya. "Research of navigational and hydrographic characteristics of flaw polynyas of the eastern sector of the Northern Sea Route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.3 (2022): 394–402. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-394-402.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Подпорин Сергей Анатольевич —
кандидат технических наук, доцент
Севастопольское отделение
ФГБУ «Государственный океанографический
институт имени Н. Н. Зубова»
299011, Российская Федерация, г. Севастополь,
ул. Советская, 61
e-mail: s.a.podporin@gmail.com

Холопцев Александр Вадимович —
доктор географических наук, профессор
Севастопольское отделение
ФГБУ «Государственный океанографический
институт имени Н. Н. Зубова»
299011, Российская Федерация, г. Севастополь,
ул. Советская, 61
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный
университет»
299053, Российская Федерация, г. Севастополь,
ул. Университетская, 33
e-mail: kholoptsev@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Podporin, Sergey A. —
PhD, associate professor
Sevastopol branch
of FSBI "N. N. Zubov's State
Oceanographic Institute"
61 Sovetskaya Str., Sevastopol, 299011,
Russian Federation
e-mail: s.a.podporin@gmail.com

Kholoptsev, Aleksandr V. —
Dr. of Geographical Sciences, professor
Sevastopol branch
of FSBI "N. N. Zubov's State
Oceanographic Institute"
61 Sovetskaya Str., Sevastopol, 299011,
Russian Federation
Sevastopol State University
33 Universitetskaya Str.,
Sevastopol, 299053,
Russian Federation
e-mail: kholoptsev@mail.ru

Статья поступила в редакцию 19 апреля 2023 г.
Received: April 19, 2023.

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-589-602

DISCRETE-EVENT MODELLING OF CONTAINER TERMINAL CARGO FRONTS

A. L. Kuznetsov¹, A. V. Galin¹, G. B. Popov²

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

² — Morstroytechnology Company, St. Petersburg, Russian Federation

The basis for designing and upgrading new sea ports and container terminals is regulatory documentation. A part of designing a new sea port is making key technological decisions, including on calculating its cargo throughput capacity. However a method for capacity evaluation of operating ports is not described in the regulatory documents. Operating cargo terminals often undergo significant changes since the moment they were put into operation. Equipment, resources and infrastructure of cargo fronts should not be the only thing taken into consideration when evaluating an existing container terminal capacity. The way in which a terminal interacts with external transport systems (railroad, vessel fleet, etc.) as well as interactions between cargo fronts inside a terminal should also be considered. A discrete-event simulation model for the system consisting of a railroad cargo front, a container yard and a berth cargo front of a container terminal is proposed in the paper. This model allows to evaluate the balance between calls of different modes of transport (vessel calls, cargo train calls), as well as the impact of this balance on the state of container yard and on the terminal cargo throughput capacity in general. Container terminal in terms of proposed model is not merely a set of unrelated objects, but a system. In such system interaction with one of elements has influence on all the others. The model is described as mathematical dependencies between key variables. Cargo train and vessel calls generation is performed via standard spreadsheet methods. To acquire more accurate results, specific sea port statistical data should be used.

Keywords: discrete-event simulation, throughput capacity, container terminals, cargo fronts, sea ports.

For citation:

Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Galin, and German B. Popov. "Discrete-event modelling of container terminal cargo fronts." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 589–602. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-589-602.

УДК 656.6

ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРУЗОВЫХ ФРОНТОВ КОНТЕЙНЕРНОГО ТЕРМИНАЛА

А. Л. Кузнецов¹, А. В. Галин¹, Г. Б. Попов²

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

² — ООО «Морское строительство и технологии», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Предметом исследования в данной работе являются вопросы проектирования новых морских портов и контейнерных терминалов на основе действующей нормативной документации. В рамках технологического проектирования осуществляется принятие основных технологических решений, предусматривающих предварительную оценку пропускной способности объекта. Однако методика оценки пропускной способности действующих предприятий указанного профиля не отражена в нормативной документации. Существующие грузовые терминалы зачастую претерпевают существенные изменения с момента их ввода в эксплуатацию. Отмечается, что при оценке пропускной способности существующего терминала необходимо учитывать не только техническое оснащение, ресурсы и инфраструктуру грузовых фронтов, но и протоколы взаимодействия терминала с внешними объектами транспорта (железная дорога, морской флот и т. д.), а также взаимосвязь грузовых фронтов между собой. В статье предлагается дискретно-событийная модель взаимодействия системы железнодорожного грузового фронта контейнерного терминала, его склада и морского грузового фронта. Данная модель позволяет оценить воздействие сбалансированности подхода транспортных средств на грузовых фронтах на наполненность склада, и, как следствие,

на пропускную способность терминала. Контейнерный терминал с точки зрения модели представляет собой не набор отдельных элементов (грузовых фронтов), а систему, в которой воздействие на один из фронтов оказывает влияние на все остальные грузовые фронты. Таким образом, в модели наглядно демонстрируется взаимосвязь, которая приводит к ситуациям, например, заполнения склада из-за недостаточной интенсивности подхода железнодорожных составов. Модель представлена в виде арифметических зависимостей между ключевыми переменными, описывающими потоки контейнеров на терминале. Генерация подхода железнодорожных составов и морских судов выполнена доступными методами работы с электронными таблицами. Для повышения точности моделирования следует использовать проанализированные статистические данные конкретного морского порта или контейнерного терминала.

Ключевые слова: дискретно-событийное моделирование, пропускная способность, контейнерные терминалы, модель, грузовой фронт, морские порты.

Для цитирования:

Кузнецов А. Л. Дискретно-событийное моделирование грузовых фронтов контейнерного терминала / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин, Г. Б. Попов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 589–602. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-589-602.

Введение (Introduction)

Проектирование морских портов и контейнерных терминалов (КТ) регулируется нормативной документацией: СП 350.1326000.2018 «Нормы технологического проектирования морских портов»¹ и СП 316.1325800.2017 «Терминалы контейнерные. Правила проектирования»². Данные нормы содержат методики определения основных характеристик и пропускной способности грузовых терминалов. Пропускная способность терминала в целом определяется по лимитирующему грузовому фронту, т. е. рассматривается как минимальное значение из ряда пропускных способностей грузовых фронтов:

$$П = \min(П_{ж}; П_{а}; П_{м}; П_{с}),$$

где $П_{ж}$ — пропускная способность железнодорожного грузового фронта (ЖГФ);

$П_{а}$ — пропускная способность автомобильного грузового фронта (АГФ);

$П_{м}$ — пропускная способность морского грузового фронта (МГФ);

$П_{с}$ — пропускная способность склада.

Единицей измерения пропускной способности являются контейнеры или TEU (англ. Twenty feet Equivalent Unit — ДФЭ (двадцатифутовый эквивалент)), проходящие через лимитирующий функциональный элемент в единицу времени, обычно месяц или год. В данном исследовании единицей измерения пропускной способности принято число контейнеров в месяц. Методики определения пропускных способностей грузовых фронтов, изложенные в нормативной документации, в целом отвечают потребностям предварительного проектирования и концептуальных проработок контейнерных терминалов, однако имеют существенные недостатки для практики их эксплуатации. В частности, грузовые фронты рассматриваются как отдельные, изолированные друг от друга элементы терминала, не влияющие друг на друга. Кроме того, соответствующая пропускная способность определяется исходя из предположения о равномерной и максимальной насыщенности грузовых фронтов потоками транспортных средств, т. е. предполагается, например, что подача железнодорожных составов на ЖГФ будет производиться железной дорогой непрерывно в течение всего года таким образом, что за одной железнодорожной подачей сразу следует другая. Иными словами, указанным способом устанавливается мощность той или иной операции, а не ее пропускная способность. Такой подход оправдан при проектировании новых терминалов, однако неприменим при оценке важнейшего параметра действующего терминала — его эксплуатационной пропускной способности грузовых фронтов существующих терминалов.

На действующих контейнерных терминалах (КТ) формируется определенный порядок взаимодействия не только между составляющими функциональными элементами, но и между терми-

¹ СП 350.1326000.2018. Нормы технологического проектирования морских портов. М.: Стандартинформ, 2018. 218 с.

² СП 316.1325800.2017. Терминалы контейнерные. Правила проектирования. М.: Стандартинформ, 2018. 54 с.

налом и железной дорогой, а также между терминалом и судопотоками. Недостаточная развитость прилегающей к терминалу транспортной инфраструктуры (ж.-д. станции, морских подходов путей, автомобильных магистралей) не может не сказаться на пропускной способности терминала. Например, нехватка ж.-д. платформ повлечет за собой невозможность разгрузить условно «импортную» часть склада (контейнеропоток в направлении с МГФ на ЖГФ). При этом условно «экспортный» контейнеропоток (в направлении с ЖГФ на МГФ) будет недостаточным из-за малого количества платформ, подаваемых на терминал, а суда будут покидать терминал не до конца заполненными. Избыток импортных контейнеров, которые будет некуда отгружать из-за нехватки платформ на ЖГФ, вызовет увеличение сроков хранения и снижение пропускной способности склада. Весь описанный процесс не находит отражения в аналитических формулах, предлагаемых в нормативной документации.

Таким образом, актуальность рассматриваемой проблемы обусловлена следующими факторами:

- существующая нормативная документация РФ содержит расчетно-аналитические методики определения пропускной способности вновь проектируемых морских портов и контейнерных терминалов;
- отсутствует какая-либо нормативная документация для оценки пропускной способности грузовых фронтов действующих морских портов и грузовых терминалов;
- наличие недостатков в методиках определения пропускной способности, рекомендуемых нормативной документацией по проектированию морских портов и контейнерных терминалов, затрудняющих применение норм для оценки пропускной способности действующих терминалов, а именно:

- 1) грузовые фронты рассматриваются в отрыве друг от друга;
- 2) не учитывается влияние внешних объектов транспортной инфраструктуры на пропускную способность терминала.

Дискретно-событийное моделирование морских портов и грузовых терминалов, в частности контейнерных, освещено как в отечественной, так и в зарубежной научной литературе [1], [2]. Одним из наиболее близких к настоящему является публикация [3], в которой приведено описание дискретно-событийной модели системы «ЖГФ – склад – МГФ». Выходными оцениваемыми параметрами модели служат средние значения длины очереди и средняя загрузка судна, а в качестве основного изменяемого параметра выбран максимальный размер склада. Такая постановка отличается от задачи, рассматриваемой в данном исследовании, где в качестве исходных данных выступают интенсивности поступления и обработки транспортных средств на грузовых терминалах и вместимость склада, а выходными параметрами являются средняя и максимальная потребная вместимость склада в течение прогона. Кроме того, в модели [3] предполагается обработка на терминале только экспортного грузопотока контейнеров, поступающего по железной дороге и уходящего с терминала морем, в то время как задачей настоящего исследования является описание как экспортного, так и импортного грузопотока контейнеров.

Некоторые авторы фокусируют внимание на исследовании работы одного грузового фронта. Так, например, в статье [4] приводится дискретно-событийная модель морского грузового фронта экспортного терминала угля, разработанная в среде имитационного моделирования AnyLogic. Достаточно близкая задача к поставленной в данном исследовании рассмотрена авторами работы [5], в которой приведен пример имитационного моделирования системы «железнодорожная станция – морской порт». Однако в большей степени авторы работы сосредоточены на анализе работы припортовой ж.-д. станции на примере станции Владивосток, взаимосвязанной с Владивостокским морским торговым портом. Описано влияние интенсивности поступления и характеристик ж.-д. составов на работу ж.-д. станции и системы «ж.-д. станция – порт» без учета влияния подхода судов и степени заполнения склада контейнеров.

Авторы серии статей [6]–[8] провели в своих исследованиях работу формализации некоторых аспектов работы контейнерных терминалов с точки зрения имитационного и дискретно-событийного моделирования. Так, например, в статье [6] приводится блок-схема обработки импортного контейнеропотока в морском порту. В указанных работах основным предметом исследований является

коммерческая составляющая процессов перегрузки в порту, в том числе таможенная обработка контейнеров в порту и взаимодействие с контролирующими органами. Модели реализованы авторами в специализированных программных средах MATLAB / Simulink.

Авторы исследования [9], например, в большинстве случаев ограничиваются моделированием одного конкретного контейнерного терминала (в данном случае это контейнерный терминал Салерно, SalCT, Италия). Данный подход является верным при углубленной проработке имитационной или дискретно-событийной модели, поскольку каждый контейнерный терминал имеет уникальный набор характеристик и зачастую состоит из уникального ряда объектов. Однако в данной работе привязка к конкретному терминалу неуместна, поскольку задачей данной статьи является модель, позволяющая выполнить оценку пропускной способности любого контейнерного терминала, обрабатывающего морским и железнодорожным грузовым фронтом.

Цель работы состоит в том, чтобы показать, что применение ДСМ для определения характеристик действующего морского порта не обязательно должно основываться на использовании специализированных средств разработки имитационных моделей. Для создания простейшей дискретно-событийной модели контейнерного терминала достаточно формализации процессов перегрузки в терминах ДСМ и использования программного обеспечения (ПО), поддерживающего работу с электронными таблицами.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В дискретно-событийной модели цена дискрета (единицы времени) принята равной одному часу, период моделирования составляет один месяц.

Основные переменные, используемые в моделировании:

- $D_{ж.э}$ — загрузка ж.-д. состава экспортными контейнерами (предназначены для перегрузки по варианту «вагон – склад»), конт.;
- $D_{ж.и}$ — загрузка ж.-д. состава импортными контейнерами (предназначены для перегрузки по варианту «склад – вагон»), конт.;
- $D_{с.эj}$ — загрузка судна типа j экспортными контейнерами (предназначены для перегрузки по варианту «склад – судно»), конт.;
- $D_{с.иj}$ — загрузка судна типа j импортными контейнерами (предназначены для перегрузки по варианту «судно – склад»), конт.;
- $d_{ж.эi}$ — заявка на разгрузку ж.-д. подачи в i -й дискрет времени, конт.;
- $d_{ж.иi}$ — заявка на загрузку ж.-д. подачи в i -й дискрет времени, конт.;
- $d_{с.эi}$ — заявка на загрузку судов в i -й дискрет времени, конт.;
- $d_{с.иi}$ — заявка на разгрузку судов в i -й дискрет времени, конт.;
- $x_{эi}$ — количество контейнеров, перемещаемых по варианту «вагон – склад» в i -й дискрет времени, конт.;
- $x_{иi}$ — количество контейнеров, перемещаемых по варианту «склад – вагон» в i -й дискрет времени, конт.;
- $y_{эi}$ — количество контейнеров, перемещаемых по варианту «склад – судно» в i -й дискрет времени, конт.;
- $y_{иi}$ — количество контейнеров, перемещаемых по варианту «судно – склад» в i -й дискрет времени, конт.;
- $\mu_{ж}$ — часовая интенсивность грузовых работ на ЖГФ, с учетом обедов, пересменок, переподач составов, конт. / ч;
- $\mu_{с}$ — часовая интенсивность грузовых работ на МГФ, с учетом обедов, пересменок, вспомогательных операций с судами, конт. / ч;
- E — вместимость склада, максимальная, конт.;
- $E_{пред}$ — предельная вместимость склада, при которой проведение грузовых операций, в том числе «копка» на складе не затруднена из-за слишком высокой плотности штабелирования, конт.;
- $E_{зап}$ — запас вместимости склада в виде незанятых слотов хранения контейнеров, предназначенных для размещения контейнеров в процессе «копки», конт.;
- $e_{эi}$ — количество экспортных контейнеров на складе (в ожидании погрузки на суда) в i -й дискрет времени, конт.;

- e_{ni} — количество импортных контейнеров на складе (в ожидании погрузки на ж.-д. платформы) в i -й дискрет времени, конт.;
- e_i — состояние склада — количество контейнеров на складе в i -й дискрет времени, конт.;
- $\bar{e}$ — среднее значение состояния склада за период моделирования, конт.; определяется как среднее арифметическое e_i среди всех дискретов времени i ;
- $e_{\max}, e_{\min}$ — максимальное и минимальное значение (соответственно) состояния склада за период моделирования, конт.;
- a_{ji} — вспомогательная переменная, обозначающая прибытие ж.-д. состава в i -й дискрет времени. Принимает значение «1», если состав прибыл в i -й дискрет времени, и значение 0, если не прибыл;
- a_{ci} — вспомогательная переменная, обозначающая прибытие судна в i -й дискрет времени; $a_{ci} = j$, если в i -й дискрет времени прибыло судно типа j , и $a_{ci} = 0$, если судно не прибывало;
- $D_3(a_{ci})$ — функция, определяющая инкремент заявки на загрузку судна в зависимости от значения a_{ci} , конт.;
- $D_{ii}(a_{ci})$ — функция, определяющая инкремент заявки на разгрузку судна в зависимости от значения a_{ci} , конт.;
- λ_j — управляющая переменная: интенсивность прибытия ж.-д. составов (единиц в неделю);
- λ_c — управляющая переменная: интенсивность прибытия судов (судозаходов в месяц).

Схема дискретно-событийной модели приведена на рис. 1.

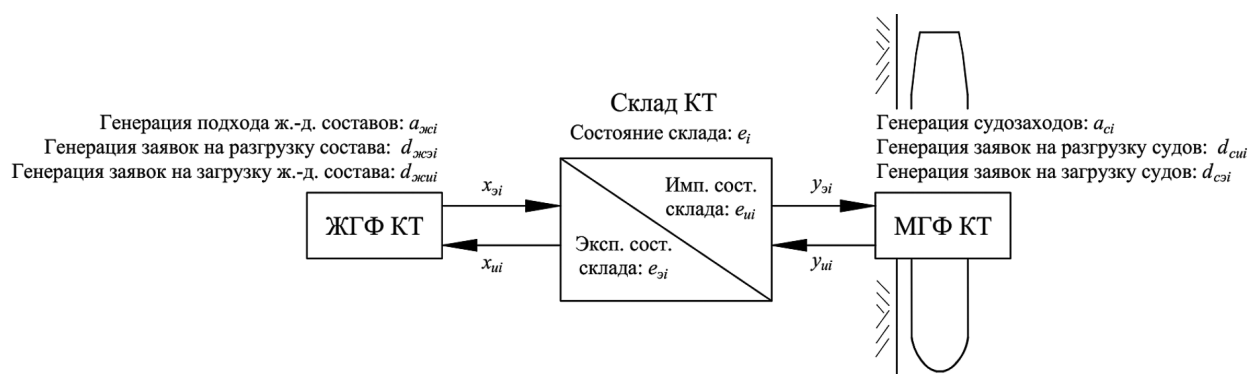


Рис. 1. Схема дискретно-событийной модели контейнерного терминала

Когда на ЖГФ терминала прибывает ж.-д. подача, заявка на разгрузку / погрузку контейнеров на ЖГФ должна возрастать на размер загрузки ж.-д. подачи в экспортном и импортном направлении соответственно. Заявка на проведение грузовых работ на ЖГФ в i -й дискрет времени зависит от размера заявки в $(i - 1)$ -й дискрет времени, от прибытия ж.-д. состава в i -й дискрет времени и от количества контейнеров, перемещенных по соответствующему варианту («вагон – склад» или «склад – вагон») в i -й дискрет времени.

Заявка на разгрузку ж.-д. подачи (количество контейнеров, которое нужно снять с ж.-д. платформ в дискрет времени i) определяется в соответствии со следующей формулой:

$$d_{жэi} = d_{жэ(i-1)} + D_{жэ} a_{ji} - x_{э(i-1)}. \quad (1)$$

Заявка на загрузку ж.-д. подачи (количество контейнеров, которое нужно погрузить на ж.-д. платформы в дискрет времени i) определяется по формуле

$$d_{жиi} = d_{жи(i-1)} + D_{жи} a_{ji} - x_{и(i-1)}. \quad (2)$$

Погрузка импортных контейнеров на ж.-д. платформы на ЖГФ не начинается до тех пор, пока не закончится выгрузка экспортных контейнеров, прибывших в составе ж.-д. подачи. При этом количество контейнеров, перегружаемых по варианту «вагон – склад» ($x_{эi}$), зависит только

от интенсивности перегрузки на ЖГФ ($\mu_{\text{ж}}$) и размера заявки на снятие контейнеров с ж.-д. платформ ($d_{\text{ж.э}i}$). Количество контейнеров, перегружаемых по варианту «склад – вагон» в этот же дискрет времени i , зависит от размера заявки на погрузку контейнеров на платформы ($d_{\text{ж.и}i}$), от интенсивности перегрузки на ЖГФ с учетом снятых в этот же дискрет времени контейнеров ($\mu_{\text{ж}} - x_{\text{э}i}$), а также от наличия импортных контейнеров на складе ($e_{\text{и}i}$). Таким образом, если импортных контейнеров на складе нет ($e_{\text{и}i} = 0$), то они не могут быть погружены на ж.-д. платформы ($x_{\text{и}i} = 0$), и если в течение всего дискрета времени i оборудование ЖГФ было занято только разгрузкой ж.-д. платформ ($x_{\text{э}i} = \mu_{\text{ж}}$), то у оборудования не останется времени для погрузки контейнеров на платформы ($x_{\text{и}i} = 0$). С учетом ранее изложенного приведены формулы (3) и (4).

Количество контейнеров, перемещаемое по варианту «вагон – склад» в i -й дискрет времени определяется по формуле

$$x_{\text{э}i} = \min \{d_{\text{ж.э}i}; \mu_{\text{ж}}\}. \quad (3)$$

Количество контейнеров, перемещаемое по варианту «склад – вагон» в i -й дискрет времени, определяется по формуле

$$x_{\text{и}i} = \min \{d_{\text{ж.и}i}; \mu_{\text{ж}} - x_{\text{э}i}; e_{\text{и}(i-1)}\}. \quad (4)$$

Заявка на разгрузку судна (количество контейнеров, которое нужно выгрузить из судна в дискрет времени i) определяется в соответствии со следующей формулой:

$$d_{\text{с.и}i} = d_{\text{с.и}(i-1)} + D_{\text{и}}(a_{\text{с}i}) - y_{\text{и}(i-1)}. \quad (5)$$

Заявка на загрузку судна (количество контейнеров, которое нужно погрузить на судно в дискрет времени i) определяется в соответствии со следующей формулой:

$$d_{\text{с.э}i} = d_{\text{с.э}(i-1)} + D_{\text{э}}(a_{\text{с}i}) - y_{\text{э}(i-1)}. \quad (6)$$

Вспомогательные функции $D_{\text{и}}(a_{\text{с}i})$, $D_{\text{э}}(a_{\text{с}i})$ принимают следующие значения в зависимости от значения переменной $a_{\text{с}i}$:

$$D_{\text{и}} = \begin{cases} 0, & \text{если } a_{\text{с}i} = 0; \\ D_{\text{с.и}j}, & \text{если } a_{\text{с}i} = j; \end{cases} \quad D_{\text{э}} = \begin{cases} 0, & \text{если } a_{\text{с}i} = 0; \\ D_{\text{с.э}j}, & \text{если } a_{\text{с}i} = j. \end{cases}$$

По аналогии с ЖГФ грузовые работы по погрузке контейнеров на судно не начинаются до тех пор, пока не закончатся работы по разгрузке судна. Таким образом, в отношении количества перемещаемых контейнеров по вариантам «судно – склад» и «склад – судно», применима та же логика, что и в отношении работ по вариантам «вагон – склад» и «склад – вагон».

Количество контейнеров, перемещаемое по варианту «судно – склад» в i -й дискрет времени определяется по формуле

$$y_{\text{и}i} = \min \{d_{\text{с.и}i}; \mu_{\text{с}}\}. \quad (7)$$

Количество контейнеров, перемещаемое по варианту «склад – судно» в i -й дискрет времени определяется по формуле

$$y_{\text{э}i} = \min \{d_{\text{с.э}i}; \mu_{\text{с}} - y_{\text{и}i}; e_{\text{э}(i-1)}\}. \quad (8)$$

Состояние склада e_i определяется как сумма импортной и экспортной составляющей склада:

$$e_i = e_{\text{и}i} + e_{\text{э}i}. \quad (9)$$

Экспортная и импортная составляющие склада зависят от потоков контейнеров, прибывающих на склад, и от потоков контейнеров, убывающих со склада, а также от количества контейнеров соответствующего направления на складе в предыдущий дискрет времени:

$$e_{\text{э}i} = e_{\text{э}(i-1)} + x_{\text{э}i} - y_{\text{э}i}; \quad (10)$$

$$e_{ii} = e_{i(i-1)} + y_{ii} - x_{ii}. \quad (11)$$

Характеристики контейнерного склада в модели задаются параметрами: E — максимальная вместимость склада, конт. и $E_{\text{пред}}$ — предельная вместимость склада, при которой возможны операции по перестановке контейнеров в штабелях при «копке», конт. Максимальная вместимость склада определяется исходя из геометрических характеристик склада: количества рядов контейнеров в штабеле по ширине w , рядов контейнеров в штабеле по длине b (бэи — от англ. bay) и максимального количества ярусов в штабеле по высоте h . Эти параметры зависят от технических характеристик используемого оборудования, допустимой нагрузки на покрытие терминала и могут различаться от штабеля к штабелю. Таким образом, величина E определяется в соответствии со следующей формулой:

$$E = \sum_{k=1}^{N_{\text{ш}}} (w_k b_k h_k), \quad (12)$$

где $N_{\text{ш}}$ — количество контейнерных штабелей на терминале.

Предельная вместимость склада $E_{\text{пред}}$ определяется исходя из максимальной вместимости склада E и запаса вместимости $E_{\text{зап}}$, предназначенного для размещения контейнеров в процессе «копки». При этом необходимо отметить, что предельная вместимость не является оптимальной, а вопрос оптимизации вместимости склада не рассматривается в данной статье. Оптимальная оперативная вместимость склада $E_{\text{опт}}$ — такая, при которой количество лишних (непроизводительных) движений складской техники при «копке» контейнеров минимально, при этом вместимость является достаточной для обеспечения бесперебойной работы грузовых фронтов терминала (автомобильного, железнодорожного, морского). Предельная вместимость $E_{\text{пред}}$ — такая, при которой на складе не возникает ситуаций с невозможностью «копки» контейнеров из-за нехватки свободных слотов в штабеле. Количество непроизводительных движений техники при этом не важно. Обычно три этих параметра взаимосвязаны следующим неравенством: $E_{\text{опт}} \leq E_{\text{пред}} < E$.

Запас вместимости $E_{\text{зап}}$ в модели определяется исходя из принятой управленческой практики, согласно которой количество свободных слотов в каждом бэе штабеля должно быть не меньше максимальной высоты штабелирования минус один:

$$E_{\text{зап}} = \sum_{k=1}^{N_{\text{ш}}} B_k (h_k - 1), \quad (13)$$

где B_k — количество бэев (рядов контейнеров по длине штабеля) в штабеле k ;

h_k — максимальная высота штабелирования в штабеле k , ярусов.

При единообразии технологии работы склада на терминале (работа на складе только одним видом оборудования с одинаковыми характеристиками) формулу (13) можно упростить до следующего вида:

$$E_{\text{зап}} = B(h-1) = \frac{E(h-1)}{w}, \quad (14)$$

где B — количество бэев на контейнерном терминале;

w — количество контейнеров в штабеле по ширине;

h — максимальная высота складирования контейнеров на терминале.

Величины B , b , E , $E_{\text{зап}}$, $E_{\text{пред}}$ могут выражаться как в контейнерах (конт.), так и в TEU. Переход между этими единицами измерения осуществляется при помощи TEU-фактора (f_{TEU}), показывающего соотношение 40- и 20-футовых контейнеров в грузопотоке. Величины w и h выражаются в ед. рядов или ед. ярусов, поскольку ширина и высота 20- и 40-футового контейнера совпадают.

Предельная вместимость склада $E_{\text{пред}}$ определяется по формуле

$$E_{\text{пред}} = E - E_{\text{зап}}. \quad (15)$$

Математическое ожидание периода подхода ж.-д. составов должно составлять

$$\tau_{\text{ж}} = \frac{168}{\lambda_{\text{ж}}}, \quad (16)$$

где 168 ч — промежуток времени, равный одной неделе, поскольку $\lambda_{\text{ж}}$ задается в количестве составов в неделю.

Математическое ожидание периода судозаходов должно составлять:

$$\tau_c = \frac{720}{\lambda_c}, \quad (17)$$

где 720 ч — промежуток времени, равный одному месяцу, поскольку λ_c задается в количестве судозаходов в месяц.

В модели предлагается задавать размытие подхода ж.-д. составов и судов вокруг значений математических ожиданий $\tau_{\text{ж}}$ и τ_c . Модель автоматически генерирует карманы времени вокруг расчетных значений периодов, а вероятность попадания периода в соответствующий карман задается пользователем (рис. 2). Такой способ генерации судозаходов отличается от способов, применяемых авторами [3], [10]. В настоящем исследовании предлагаемый способ генерации судозаходов несколько более грубый, однако он является более наглядным для оператора модели, позволяя напрямую выполнять манипуляции с плотностью распределения периода судозаходов.

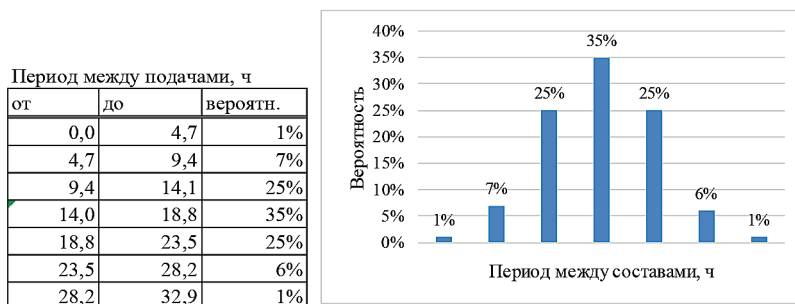


Рис. 2. Генерация периода подхода ж.-д. составов

По аналогии с генерацией периода подхода ж.-д. составов, приведенной на рис. 2, генерируются периоды судозаходов. При этом кроме генерации периода судозаходов, необходимо выполнить генерацию типа судна в зависимости от его контейнеровместимости (рис. 3). Каждая группа контейнеровместимости j имеет заданную загрузку импортными (приходящими на судне) контейнерами $D_{c,ij}$ и загрузку экспортными (погружаемыми на судно) контейнерами $D_{c,эj}$. Величины $D_{c,ij}$, $D_{c,эj}$, $D_{ж.и}$, $D_{ж.э}$ задаются пользователем.

Группы судов (j)	$D_{c,ij}$, конт.	$D_{c,эj}$, конт.	$P(j)$
от 0 до 500 TEU	113	113	30%
от 500 до 1 тыс. TEU	188	187	20%
от 1 до 2 тыс. TEU	447	446	20%
от 2 до 3 тыс. TEU	828	827	10%
от 3 до 4 тыс. TEU	1046	1045	10%
свыше 4 тыс. TEU	939	939	10%

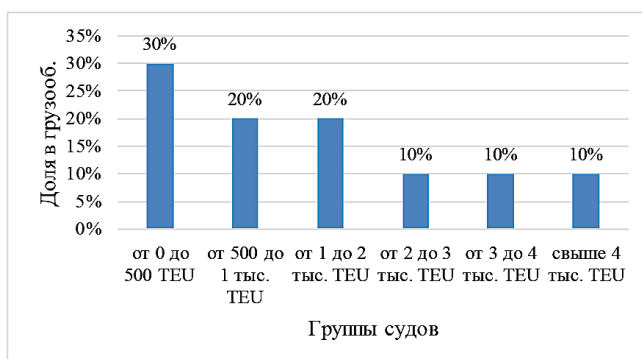


Рис. 3. Генерация судов в соответствии с группами контейнеровместимости

Формулы (1)–(15) позволяют выполнить моделирование в любой программной среде, предназначенной для работы с электронными таблицами. В данном исследовании использовано программное обеспечение Visual Basic Application MS Excel 2013.

Результаты (Results)

На модели был проведен ряд экспериментальных прогонов для оценки ее адекватности. В прогонах варьировались интенсивности прибытия морских судов λ_c и ж.-д. составов $\lambda_{ж}$, при этом остальные параметры моделируемого контейнерного терминала не изменялись.

Тестовая конфигурация термина включала один причал для обработки судов-контейнеровозов, оборудованный тремя причальными контейнерными перегружателями STS (от англ. Ship-To-Shore). Производительность одного STS принята равной 25 конт./ч. Таким образом, интенсивность работ на морском грузовом фронте составляет $\mu_c = 3 \times 25 = 75$ конт./ч. Железнодорожный грузовой фронт оснащен четырьмя контейнерными перегружателями на пневмоколесном (RTG — англ. Rubber Tyred Gantry) либо на рельсовом ходу (RMG — англ. Rail Mounted Gantry). Производительность одного перегружателя принята равной 20 конт./ч. Таким образом, интенсивность работ на ЖГФ составляет $\mu_{ж} = 4 \cdot 20 = 80$ конт./ч. Такой способ определения величин μ_c и $\mu_{ж}$ является примитивным, но вполне достаточным для тестовых прогонов модели. При определении интенсивности работ на грузовых фронтах реального контейнерного терминала рекомендуется следовать методике, изложенной в СП 350.1326000.2018, или использовать результаты анализа статистических данных о работе терминала.

Максимальная вместимость склада, определяемая геометрическими и технологическими характеристиками терминала, принята равной 7000 TEU. На всем складе предполагается использование единой технологии хранения контейнеров. Ширина штабеля $w = 12$ рядов. Максимальная высота штабелирования $h = 5$ ярусов. Такие характеристики штабелей соответствуют технологии хранения контейнеров с использованием складских козловых контейнерных перегружателей на рельсовом ходу (RMG). Поскольку технология хранения единая, можно воспользоваться формулой (14) для определения $E_{зап}$.

Размер запаса свободных слотов составляет $E_{зап} = 2333$ TEU, предельная вместимость склада составляет $E_{пред} = 4667$ TEU в соответствии с формулой (15). При TEU-факторе $f_{TEU} = 1,7$ (70 % 40-футовых и 30 % 20-футовых контейнеров в грузопотоке) величины $E_{зап}$ и $E_{пред}$ будут составлять 1373 конт. и 2745 конт. соответственно. Максимальная вместимость склада, выраженная в контейнерах, $E = 4118$ конт.

Количество контейнеров в составе ж.-д. подачи для выгрузки с платформ ($D_{ж.э}$) принято равным 80 конт., что соответствует контейнерному поезду длиной 38 платформ 80-фут. при максимальной вместимости одной платформы 4 TEU, TEU-факторе, равном 1,7, и коэффициенте заполнения платформ 0,9. Количество контейнеров к погрузке на платформы принято $D_{ж.и} = D_{ж.и} = 80$ конт. В модели предполагается, что в начальный момент времени ($i = 0$) состояние склада, т. е. количество контейнеров на складе, составляет половину от предельной вместимости склада:

$$e_0 = \frac{E_{пред}}{2} = 1373 \text{ конт.}$$

Серия тестовых экспериментов с моделью включала четыре серии прогонов:

- прогон 1 — интенсивности λ_c и $\lambda_{ж}$ сбалансированы и соответствуют интенсивностям грузовых работ μ_c и $\mu_{ж}$;
- прогон 2 — интенсивность подхода судов λ_c существенно превышает интенсивность $\lambda_{ж}$, при этом μ_c и $\mu_{ж}$ позволяют обработать грузопотоки на соответствующих фронтах;
- прогон 3 — интенсивность подхода ж.-д. составов $\lambda_{ж}$ существенно превышает интенсивность λ_c , при этом μ_c и $\mu_{ж}$ позволяют обработать грузопотоки на соответствующих фронтах;
- прогон 4 — интенсивности λ_c и $\lambda_{ж}$ сбалансированы, при этом они превышают интенсивности грузовых работ μ_c и $\mu_{ж}$.

Пример окна дискретно-событийной модели приведен на рис. 4. Зависимости между значениями, приведенными на рисунке, описаны в формулах (1)–(15).

i	a_{ji}	d_{jzi}	d_{jui}	x_{zi}	x_{ui}	e_{ui}	e_{zi}	e_i	y_{ui}	y_{zi}	a_{ci}	d_{cui}	d_{czi}
0	1	80	95	50	0	2500	2500	5000	0	0		0	0
1		30	95	30	20	2480	2530	5010	0	0		0	0
2		0	75	0	50	2430	2530	4960	0	0		0	0
3		0	25	0	25	2405	2530	4935	0	0		0	0
4		0	0	0	0	2405	2530	4935	0	0		0	0
5		0	0	0	0	2455	2530	4985	50	0	3	447	446
6		0	0	0	0	2505	2530	5035	50	0		397	446
7		0	0	0	0	2555	2530	5085	50	0		347	446
8		0	0	0	0	2605	2530	5135	50	0		297	446
9		0	0	0	0	2655	2530	5185	50	0		247	446
10		0	0	0	0	2705	2530	5235	50	0		197	446
11		0	0	0	0	2755	2530	5285	50	0		147	446
12		0	0	0	0	2805	2530	5335	50	0		97	446

Рис. 4. Пример дискретно-событийной модели в формате электронных таблиц

Исходные данные и наиболее показательные результаты экспериментов приведены в следующей таблице.

Результаты тестовых прогонов на модели

Прогон модели	Исходные данные		Результаты						
	λ_c	$\lambda_{ж}$	e (среднее)	$\frac{e}{E}$	$e_{\max}$	$\frac{e_{\max}}{E_{\text{пред}}}$	$\frac{e_{\max}}{E}$	СКО (e)	$e > E_{\text{пред}}$
	Единица измерения								
	судозаход / мес.	сост. / нед.	конт.	%	конт.	%	%	конт.	Результат
Прогон 1	9,7	14	1597	39 %	2592	94 %	63 %	281	Нет
Прогон 2	20	14	5525	134 %	11496	419 %	279 %	2302	Да
Прогон 3	10	35	10011	243 %	20639	752 %	501 %	4794	Да
Прогон 4	65	75	3457	84 %	6791	247 %	165 %	1154	Да

На рис. 5 показаны срезы состояния склада с разбивкой по направлениям движения контейнеров через склад.

а)

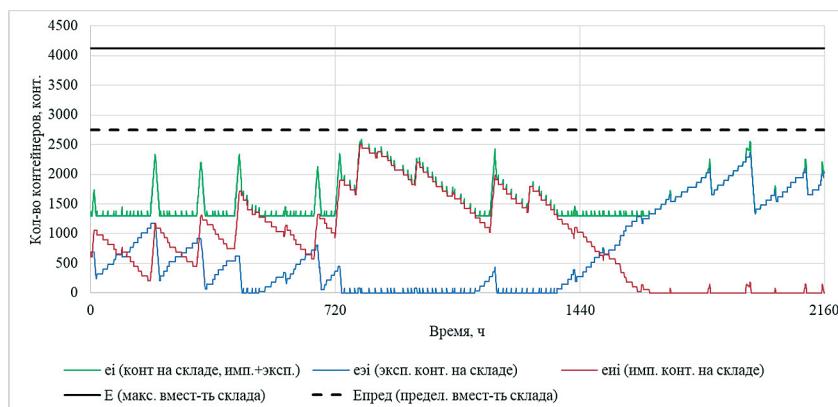
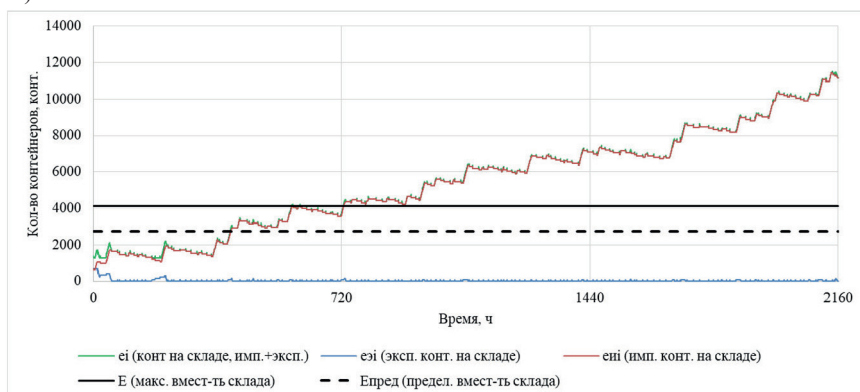
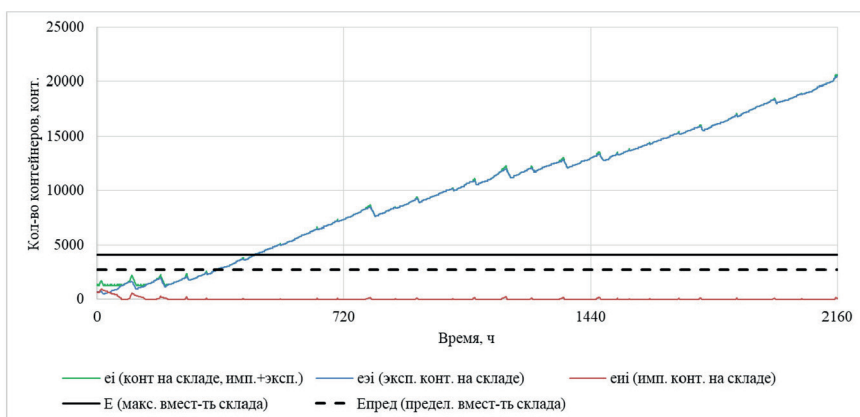


Рис. 5. Состояние склада моделируемого контейнерного терминала: а — прогон 1 (Начало)

б)



в)



г)

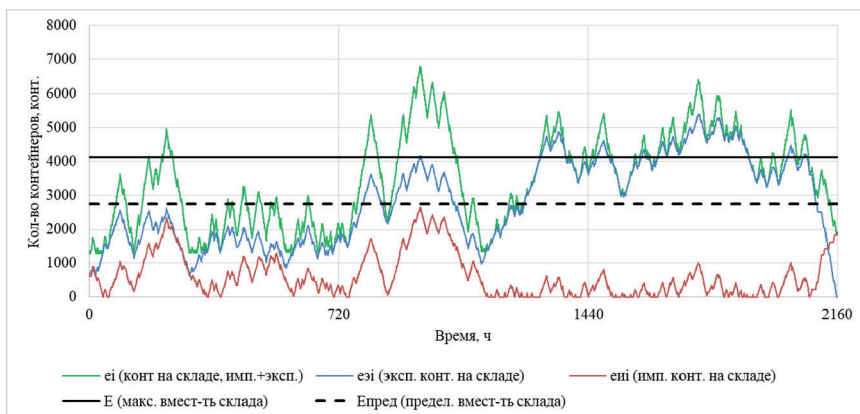


Рис. 5. Состояние склада моделируемого контейнерного терминала:
б — прогон 2; в — прогон 3; г — прогон 4 (Окончание)

Как видно из приведенной таблицы и рис. 5, результаты моделирования существенно различаются при разных исходных данных.

Обсуждение (Discussion)

В первом случае (прогон 1) интенсивности поступления транспорта на терминал (λ_c и $\lambda_{ж}$) имели достаточно низкие значения, с которыми легко справлялось оборудование терминала. При этом λ_c и $\lambda_{ж}$ были сбалансированы, таким образом, что ни один тип транспортных средств не превалировал над другим. Срез состояния склада, соответствующего этой ситуации представлен на рис. 5, а. Импортная и экспортная составляющие склада несколько раз сменяют друг друга в процентном отношении в течение прогона. Всплески импортных контейнеров на складе соответствуют прибытию

судов, из которых производится выгрузка контейнеров. При этом суда забирают экспортные контейнеры, которых становится существенно меньше на складе. Всплески экспортных контейнеров соответствуют периодам отсутствия судозаходов. В течение таких периодов на железнодорожном грузовом фронте (ЖГФ) продолжают поступать партии контейнеров, приходящие ж.-д. составами, а со склада убывают импортные контейнеры, уходящие ж.-д. транспортом.

Прогон 2 и 3 демонстрируют картину неограниченного роста одной составляющей склада. В прогоне 2 λ_c существенно превышает $\lambda_{ж}$, из-за чего на складе растет количество выгружаемых из судов импортных контейнеров (рис. 5, б). Пики неограниченно растущей кривой совпадают с подходом судов и поступлением импортных контейнеров на склад. При этом ж.-д. платформ подается слишком мало, и контейнеры не успевают вывозиться с терминала. Обратная ситуация наблюдается в прогоне 3, в котором $\lambda_{ж}$ существенно превышает λ_c (рис. 5, в). В этом прогоне количество заходящих судов недостаточно, чтобы справиться с поступающими экспортными контейнерами.

Таким образом, экспортные контейнеры в неограниченном количестве накапливаются на складе. При этом заметна следующая разница в форме кривых, приведенных на рис. 5, б и в: в случае избытка экспортных контейнеров, прибывающих ж.-д. составами, форма кривой более сглаженная, поскольку ж.-д. транспорт заходит на терминал чаще, но его партии меньше, чем на морском транспорте. При слишком высокой интенсивности подхода судов по сравнению с ж.-д. транспортом форма кривой больше напоминает «пилу», ввиду меньшей интенсивности захода судов, однако судовые партии здесь больше, чем партии контейнеров, прибывающие ж.-д. транспортом.

В прогоне 4 интенсивности λ_c и $\lambda_{ж}$ снова сбалансированы, однако теперь они превышают способность терминала по переработке груза (μ_c и $\mu_{ж}$). Из-за этого состояние склада e_i имеет более непредсказуемый характер. Это видно из рис. 5, г, а также из значения среднеквадратического отклонения (СКО) величины e_i от среднего значения, указанного в таблице на с. 598. Для прогона 1 СКО e_i составляло всего 281 контейнер, в то время как для прогона 4, также сбалансированного между λ_c и $\lambda_{ж}$, СКО e_i составило 1154 контейнера (больше чем в 4 раза выше). Кроме того, состояние склада e_i в течение прогона 4 несколько раз превышает как $E_{пред}$, так и E . Это означает, что при таких исходных данных терминал не сможет нормально работать.

Необходимо отметить, что некоторая часть порядка работы контейнерного терминала была упрощена для сохранения простоты модели. Например, очевидно, что склад терминала не может расти неограниченно, и графики на рис. 5 должны иметь несколько иной вид. Контейнеры должны накапливаться до значения E , при котором невозможны дальнейшие операции по их приему. В точке достижения $e_i = E$ график должен превращаться в горизонтальный отрезок, пока не будет произведена разгрузка склада, при этом в модели график растет неограниченно. Однако это не означает, что модель ведет себя некорректно, такая форма представления неограниченного роста склада свидетельствует о существенном дисбалансе в интенсивностях подхода транспорта на грузовые фронты.

Заключение (Conclusion)

В выполненном исследовании предлагается относительно простая в реализации дискретно-событийная модель взаимодействия грузовых фронтов контейнерного терминала: «ЖГФ – склад – МГФ», реализованная в виде электронной таблицы с зависимостями между основными параметрами. Тестовая серия экспериментов на модели показала ее адекватность.

Данная дискретно-событийная модель позволяет решить следующие задачи, связанные с оценкой пропускной способности действующих морских портов и контейнерных терминалов:

- оценка пропускной способности с учетом не только технологического оборудования, но и текущей интенсивности подхода транспортных средств;
- оценка пропускной способности терминала с учетом взаимосвязи между грузовыми фронтами (большое количество судов и малое количество ж.-д. платформ приведет к переполнению склада, тогда как расчет по фронтам может показать, что каждый грузовой фронт в отдельности имеет возможность справиться с грузооборотом);

– реализация простого и доступного инструмента, удобного для применения с любыми средствами работы с электронными таблицами.

В перспективе данная модель может быть усовершенствована в следующих направлениях:

- 1) добавление в нее автомобильного грузового фронта (АГФ);
- 2) совершенствование логики модели с точки зрения накопления и расформирования склада: запрет на превышение предельной или максимальной вместимости склада, организация только разгрузки склада при его заполнении;
- 3) совершенствование логики модели с точки зрения сроков хранения контейнеров на терминале: введение минимального срока хранения, необходимого для оформления документов перед отправкой контейнеров, подсчет среднего срока хранения контейнеров;
- 4) выделение дополнительных видов перегружаемых контейнеров: рефрижераторные контейнеры и контейнеры с опасными грузами;
- 5) введение дополнительных зон терминала в модель: склад СВХ, зона таможенного контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бунина А. В. Обзор современных средств имитационного моделирования в области транспорта / А. В. Бунина, Д. А. Сивицкий // Интеллектуальный потенциал Сибири. — 2020. — С. 288–290.
2. Dragović B. Simulation modelling in ports and container terminals: literature overview and analysis by research field, application area and tool / B. Dragović, E. Tzannatos, N. K. Park // Flexible Services and Manufacturing Journal. — 2017. — Vol. 29. — Pp. 4–34. DOI: 10.1007/s10696-016-9239-5.
3. Кузнецов А. Л. Имитационное моделирование как инструмент оценки влияния вместимости склада морского порта на качество обработки наземного транспорта / А. Л. Кузнецов, А. Д. Семенов, С. С. Валькова // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2019. — № 54–55. — С. 19–30.
4. Мазуренко О. И. Дискретно-событийное моделирование морского грузового фронта экспортного угольного терминала в среде Anylogic / О. И. Мазуренко, И. А. Русинов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2022. — № 2. — С. 102–114. DOI: 10.24143/2073-1574-2022-2-102-114.
5. Король Р. Г. Имитационное моделирование системы «Железнодорожная станция морской порт» на примере Владивостокского транспортного узла / Р. Г. Король, А. С. Балалаев // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 209–216. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-209-216.
6. Янченко А. А. Дискретно-событийная модель в задачах эксплуатации контейнерных терминалов / А. А. Янченко, Т. Е. Маликова // Эксплуатация морского транспорта. — 2017. — № 4 (85). — С. 25–31.
7. Янченко А. А. Экспериментальные исследования влияния зонирования контейнерного терминала на эффективность его работы в условиях свободного порта Владивосток / А. А. Янченко, Т. Е. Маликова, Д. А. Оськин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 57–67. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-57-67.
8. Янченко А. А. Научные подходы к исследованию процессов функционирования морских портов и портовых терминалов / А. А. Янченко // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2018. — № 55. — С. 185–192.
9. Carteni A. Tactical and strategic planning for a container terminal: Modelling issues within a discrete event simulation approach / A. Carteni, S. De Luca // Simulation Modelling Practice and Theory. — 2012. — Vol. 21. — Is. 1. — Pp. 123–145. DOI: 10.1016/j.simpat.2011.10.005.
10. Кузнецов А. Л. Моделирование работы морского грузового фронта / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, Д. А. Зайкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 33–42. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-33-42.

REFERENCES

1. Bunina, A. V. and D. A. Sivitskiy “Overview of modern tools for simulation modelling of transport.” *Intellectual Potential of Siberia* (2020): 288–290.

2. Dragović, Branislav, Ernestos Tzannatos, and Nam Kuy Park. "Simulation modelling in ports and container terminals: literature overview and analysis by research field, application area and tool." *Flexible Services and Manufacturing Journal* 29 (2017): 4–34. DOI: 10.1007/s10696-016-9239-5.
3. Kuznetsov, A. L., A. D. Semenov, and S. S. Valkova. "Simulation tool for evaluation of influence of seaport warehouse capacity on inland transport service quality." *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 54–55 (2019): 19–30.
4. Mazurenko, Ol'ga Igorevna, and Igor' Aleksandrovich Rusinov. "Discrete-event simulation of sea cargo front of export coal terminal in Anylogic environment." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2022): 102–114. DOI: 10.24143/2073-1574-2022-2-102-114.
5. Korol, R. G., and A. S. Balalaev. "The simulation modeling system "Railway station — Seaport" Vladivostok transport hub." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 209–216. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-209-216.
6. Yanchenko, A. A., and T. E. Malikova. "A discrete — event model for operations in container terminals." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4 (2017): 25–31.
7. Yanchenko, Anna A., Tatiana E. Malikova, and Dmitry A. Oskin. "Experimental studies of the impact of a container terminal zoning on its operation efficiency under the conditions of the free port Vladivostok." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 57–67. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-57-67.
8. Yanchenko, A. A. "Scientific approaches to the sea ports and port terminals operating processes study." *Bulletin of VSAWT* 55 (2018): 185–192.
9. Carteni, Armando, and Stefano De Luca. "Tactical and strategic planning for a container terminal: Modelling issues within a discrete event simulation approach." *Simulation Modelling Practice and Theory* 21.1 (2012): 123–145. DOI: 10.1016/j.simpat.2011.10.005.
10. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Dmitrii A. Zaikin. "Simulation of the sea cargo front operation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 33–42. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-33-42.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Александр Львович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: thunder1950@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru
Галин Александр Валентинович —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: galin2403@gmail.com, kaf_top@gumrf.ru
Попов Герман Борисович —
кандидат технических наук,
инженер отдела технологии
ООО «Морское строительство и технологии»
195220, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Гжатская, 21 к. 2, лит. А
e-mail: german_bp@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov, Aleksandr 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: thunder1950@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru
Galin, Aleksandr V. —
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: galin2403@gmail.com, kaf_top@gumrf.ru
Popov, German B. —
PhD,
technology department engineer
Morstroytechnology Company
21/2 Gzhatskaya Str., St. Petersburg, 195220,
Russian Federation
e-mail: german_bp@mail.ru

Статья поступила в редакцию 27 апреля 2023 г.
Received: April 27, 2023.

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-603-616

JUSTIFICATION OF THE CONTAINER STACK UNPACKING TECHNOLOGICAL OPERATION SCHEME IN THE AUTOMATION OF THE LOADER WORK CYCLE

V. V. Gannesen¹, T. E. Malikova², E. E. Petrova¹

¹ — Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russian Federation

² — Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoi,
Vladivostok, Russian Federation

Due to the new concept of the country transport logistics development “Turning to the East”, it is becoming the more important to increase the processing capacity of container terminals in the Far East. This research work is to study the possibilities of increasing the throughput capacity of container terminal areas by making the technical and technological management decisions. The opportunity of introducing automation elements into the terminal operation through the creation of a technological cyclic automatic machine on the basis of mobile container transporters is investigated as an idea to increase the processing capacity of the terminal equipment. In the context of developing the concept of the loader operation as a technological machine, the “working cycle” term is defined as a sequence of actions during performing the technological operation of picking up the target container from the stack, and then the transition diagram of the machine is an analogue of the technological scheme of this operation. Based on the foregoing, the purpose of the study is defined as the rationale for choosing a unified scheme for the technological operation of dismantling the container stack as part of automating the working cycle of a loader. To achieve this purpose, the following tasks are solved: the technical capabilities of loaders such as a reach stacker and a loader with an upper grip spreader are studied when working with a stack depending on the location of the target container in the latter; technological schemes for the execution of the operation of picking up target containers from a stack, differing in the type of equipment used and the method of disbanding blocking stacks, are considered; the positive and negative aspects of using each of the technological schemes as an analogue of the transition diagram of the technological machine control unit are revealed. The result of the research work is the technological scheme “the use of a reach stacker or a loader with a top grip spreader with complete disassembly of blocking stacks and picking up containers only from the near row”, which is the most preferable in terms of such important indicators for automating the technological process as versatility, “trouble-free” execution technology, insensitivity to stack capacity.

Keywords: cargo handling, terminal throughput, transshipment process control, automation, equipment operating cycle, technological automaton, mechanized cargo handling.

For citation:

Gannesen, Vitalii V., Tatiana E. Malikova, and Ekaterina E. Petrova. “Justification of the container stack unpacking technological operation scheme in the automation of the loader work cycle.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 603–616. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-603-616.

УДК 004.8: 656.073.28

ОБОСНОВАНИЕ СХЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ РАСФОРМИРОВАНИЯ КОНТЕЙНЕРНОГО ШТАБЕЛЯ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ РАБОЧЕГО ЦИКЛА АВТОПОГРУЗЧИКА

В. В. Ганнесен¹, Т. Е. Маликова², Е. Е. Петрова¹

¹ — Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, г. Владивосток, Российская Федерация

² — Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского, Владивосток, Российская Федерация

Темой работы является актуальная в связи с новой концепцией развития транспортной логистики страны «Поворот на Восток» проблема повышения перерабатывающей способности контейнерных терминалов

Дальневосточного бассейна. В рамках данного исследования была поставлена задача изучения возможности увеличения пропускной способности зон контейнерных терминалов с технической и технологической сторон принятия управленческих решений. В качестве идеи увеличения перерабатывающей способности оборудования терминала исследована перспектива внедрения в его работу элементов автоматизации через создание на базе мобильных контейнерных перегружателей технологического автомата циклического действия. В контексте разработки концепции работы перегружателя как технологического автомата термин «рабочий цикл» был определен как последовательность действий при исполнении технологической операции выемки целевого контейнера из штабеля, тогда диаграмма переходов автомата является аналогом технологической схемы данной операции. Исходя из этого цель исследования определяется как обоснование выбора унифицированной схемы технологической операции расформирования контейнерного штабеля в рамках автоматизации рабочего цикла автопогрузчика. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: изучены технические возможности перегружателей типа ричстакер и автопогрузчик со спредером верхнего захвата при работе со штабелем в зависимости от местоположения в данном случае целевого контейнера; рассмотрены технологические схемы исполнения операции выемки целевых контейнеров из штабеля, различающиеся типом используемого оборудования и способом расформирования блокирующих стеков; выявлены положительные и отрицательные стороны использования каждой из технологических схем как аналога диаграммы переходов блока управления технологического автомата. Результатом исследования является технологическая схема «применение ричстакера или погрузчика со спредером верхнего захвата с полным разбором блокирующих стеков и выемкой контейнеров только из ближнего ряда» как наиболее предпочтительная по таким важным показателям для автоматизации технологического процесса, как универсальность, «безотладочная» технология исполнения, а также нечувствительность к емкости штабеля.

Ключевые слова: грузопереработка, пропускная способность терминала, управление перегрузочным процессом, автоматизация, рабочий цикл оборудования, технологический автомат, безлюдные технологии.

Для цитирования:

Ганнесен В. В. Обоснование схемы технологической операции расформирования контейнерного штабеля при автоматизации рабочего цикла автопогрузчика / В. В. Ганнесен, Т. Е. Маликова, Е. Е. Петрова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 603–616. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-603-616.

Введение (Introduction)

Введение санкций против России оказало значительное влияние на деятельность многих транспортных компаний. Отказ крупнейших Европейских контейнерных линий и хабов от перевозки и перевалки российских грузов в 2022 г. оказал существенное влияние на перераспределение грузооборота между портами Северо-Западной части страны и портами Дальневосточного региона. По данным источника [1], в северо-западных портах в 2022 г. было заблокировано до 50 % импортного и до 60 % экспортного грузопотоков, что автоматически привело к трансформации цепей поставок, изменению маршрутов и объемов контейнерных перевозок морским и железнодорожным видами транспорта с переориентацией на азиатские рынки морских перевозок. Так, только за первое полугодие 2022 г. экспортные потоки из портов Дальнего Востока увеличились на 21 % по сравнению с аналогичным периодом 2021 г., а к октябрю рост контейнерного потока через Дальневосточные терминалы достиг отметки в 29 %.

На основе анализа статистических данных, приведенных в открытых источниках [2], [3], сделан вывод о том, что после возникновения геополитических и экономических конфликтов с западными странами в Российской Федерации сформировалась устойчивая концепция развития ее международной логистики — «Поворот на Восток», реализация которой явилась одной из причин увеличения объемов импортных и экспортных, а также внутрироссийских контейнерных грузоперевозок через порты Дальнего Востока в 2022 г. Опыт работы российских транспортных компаний за 2022 г. убедительно доказал, что основным ограничением в реализации сценария «Поворот на Восток» явилась малая пропускная способность Дальневосточных морских и железнодорожных контейнерных терминалов [4].

Оперативно увеличить пропускную способность контейнерных терминалов в очень короткий срок можно только с технической и / или технологической стороны принятия управленческого

решения [5], [6]. С технической точки зрения задача решается за счет преобразований инфраструктуры терминала с использованием мобильного перегрузочного оборудования в качестве доминирующих механизмов складской грузопереработки [7]–[9]. С технологической точки зрения видоизменяются процессы выполнения погрузочно-разгрузочных операций и операций, связанных с необходимостью перемещения контейнерных потоков между технологическими зонами терминала [10]–[12]. В первом случае поиск оптимального решения задачи увеличения пропускной способности терминала находится в области обеспечения плотного складирования контейнеров, рационального размещения штабелей на складской площадке с удобным доступом штабелирующих машин к целевым контейнерам при выдаче их с терминала на железнодорожный, морской или автомобильный транспорт; обоснованного прежде всего объемом и структурой перерабатываемого грузопотока, выбора перегрузочного оборудования (кранов мостового типа, автопогрузчиков и т. п.) [13]. Во втором случае исследуются и разрабатываются технологии, позволяющие ускорить работу с контейнерами за счет применения различных стратегий управления контейнерными потоками (например, стратегия усиления приоритетных операций за счет перераспределения численности технологического оборудования в моменты возникновения пиковых нагрузок, стратегия зонирования контейнерной площадки по видам транспорта и т. п.) или перемещений контейнеров между ярусами одного и того же штабеля (контейнеры, которые понадобятся в ближайшее время поднимают в верхний ярус) во время отсутствия пиковых нагрузок на оборудование терминала [14]–[16].

Исходя из ранее изложенного, рассматриваемая задача, которая является в своей многовариантной постановке многофакторной, по-прежнему остается актуальной в рамках развития научного направления «Технология, организация и управление перегрузочными процессами порта», и прорабатывается с использованием как традиционных, давно зарекомендовавших себя научных подходов [17], [18], так и принципиально новых направлений, например, так называемых *безлюдных технологий* [19]–[21].

Возрастающий интерес к созданию безлюдных технологий на контейнерных терминалах обусловлен тем, что операция перемещения контейнера отличается однотипностью (захват – перенос – установка), перемещаемый при этом объект (контейнер) унифицирован, а сам технологический процесс отличается строгой организацией и сравнительно низкой требуемой точностью размещения контейнера в стеке. Эти условия в совокупности существенно облегчают задачу автоматизации отдельных технологических процессов на контейнерных терминалах с механизированной системой грузопереработки [22], позволяя активно использовать относительно простых роботов со сравнительно невысокой маневренностью и точностью позиционирования [23]–[25]. Два последних критерия: маневренность и точность позиционирования, свидетельствуют о наличии возможности использования мобильных перегружателей типа ричстакера как составного элемента технологического оборудования структуры технологического автомата (ТА) циклического действия [26], выполняющего селективную выемку части контейнеров из основного штабеля для определенных целей (погрузка на транспортное средство, выдача контейнеров грузовладельцам, взвешивание и т. п.).

Под *рабочим циклом перегружателя* традиционно понимают последовательность выполнения операции перемещения контейнера: захват контейнера, его перенос и установку. В контексте данного исследования (использование на терминале мобильного перегружателя как ТА) было дано другое определение рабочего цикла: последовательность рабочих и холостых ходов технологического оборудования при выемке целевых контейнеров [26]. Вообще, под рабочим ходом погрузчика понимают производительные операции, связанные с выемкой из штабеля целевых контейнеров, т. е. тех, на которые поступили заявки в данный момент времени, а под холостыми — непроизводительные операции, связанные со снятием контейнеров, блокирующих целевой контейнер в стеке, и возврат последних (блокирующих контейнеров) в их стек после вывоза целевого контейнера во вспомогательный штабель. Таким образом, понятие рабочего цикла становится напрямую связанным с «рисунком» схемы технологической операции расформирования контейнерного штабеля, которая, в свою очередь, зависит от технических возможностей конкретного используемого оборудования.

Целью данного исследования является обоснование выбора унифицированной схемы технологической операции расформирования контейнерного штабеля в рамках автоматизации рабочего цикла автопогрузчика, а его объектом служат технические характеристики перегружателей типа ричстакер и автопогрузчик со спредером верхнего захвата [27] по отношению к технологической операции расформирования операционного штабеля.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Проанализируем технические возможности ричстакера при работе со штабелем в зависимости от местоположения в последнем целевого контейнера. Положение контейнера, с которым может работать ричстакер, определяется двумя параметрами: геометрической досягаемостью и весовым ограничением. Геометрическая досягаемость контейнера характеризуется доступной удаленностью по горизонтали $X_{\text{дост}}$ и доступной удаленностью по вертикали $h_{\text{дост}}$ (рис. 1).

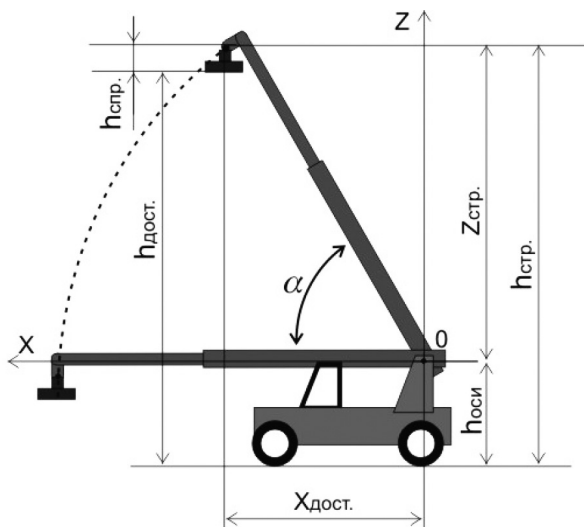


Рис. 1. Геометрическая досягаемость контейнера для ричстакера

Доступная удаленность по горизонтали $X_{\text{дост}}$ в общем случае может быть выражена в виде

$$X_{\text{дост}} = l_{\text{стр}} \cdot \cos \alpha, \quad (1)$$

где $l_{\text{стр}}$ — максимальная длина стрелы от оси опоры до оси подвеса спреdera.

Доступная удаленность по вертикали $h_{\text{дост}}$ в общем случае может быть выражена в виде

$$h_{\text{дост}} = h_{\text{оси}} + l_{\text{стр}} \cdot \sin \alpha, \quad (2)$$

где $h_{\text{оси}}$ — возвышение оси опоры стрелы над поверхностью площадки.

Наиболее актуальным является вопрос: с каким ярусом контейнеров может работать ричстакер в заданном ряду (при работе через ряды). В этом случае доступная высота может быть выражена следующим образом:

$$h_{\text{дост}} = h_{\text{оси}} + l_{\text{стр}} \cdot \arccos \left(\frac{x_i}{l_{\text{стр}}} \right) - h_{\text{спр}} - h_{\text{зап}}, \quad (3)$$

где x_i — горизонтальное расстояние от оси опоры стрелы до центра тяжести контейнера;

$h_{\text{спр}}$ — высота спреdera от оси подвеса до его нижней кромки;

$h_{\text{зап}}$ — запас высоты для перемещения контейнера над нижерасположенным ярусом.

Для условного ричстакера с колесной базой 8,5 м и приблизительными размерами, используемыми в выражениях (1)–(3), оборудованного стрелами разной длины, диаграмма досягаемости контейнеров при работе через ряды приведена на рис. 2.

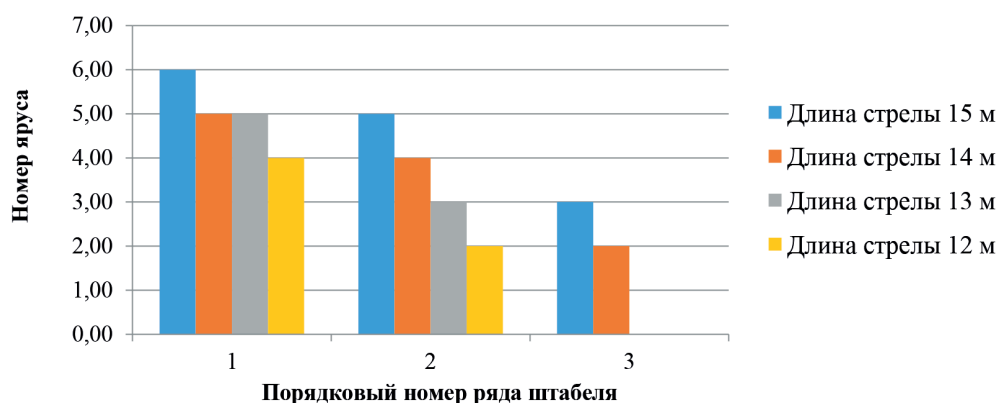


Рис. 2. Достигаемость контейнера для условного ричстакера

При этом геометрическая достигаемость еще не гарантирует возможность обработки контейнера, поскольку превышение допустимого веса теоретически приведет к опрокидыванию ричстакера. На практике при попытке подъема сработает механизм защиты от опрокидывания, по сигналу которого спредер отпустит «тяжелый» контейнер и подъем аварийно будет прекращен.

Условие неустойчивого равновесия определяется равенством моментов (рис. 3):

$$M_{\text{опр}} = M_{\text{в}}, \quad (4)$$

где $M_{\text{опр}}$ — момент опрокидывающий;
 $M_{\text{в}}$ — момент восстанавливающий.

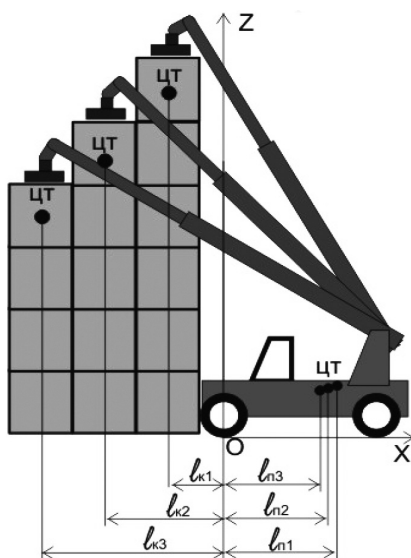


Рис. 3. Изменение восстанавливающего момента ричстакера в зависимости от ряда контейнеров

Момент опрокидывающий при подъеме контейнера определяется в виде

$$M_{\text{опр}} = m_{\text{к}} l_{\text{к}} + m_{\text{р.опр}} l_{\text{р.опр}},$$

где $m_{\text{к}}$ — масса контейнера;

$l_{\text{к}}$ — плечо контейнера — горизонтальное расстояние между точкой передней опоры ричстакера и вертикалью центра тяжести контейнера;

$m_{\text{р.опр}}$ — масса ричстакера, находящаяся на стороне груза относительно вертикали точки опоры;

$l_{\text{р.опр}}$ — плечо массы ричстакера, находящейся на стороне груза относительно вертикали точки опоры.

Момент восстанавливающий:

$$M_{\text{в}} = m_{\text{р.в}} l_{\text{р.в}},$$

где $m_{\text{р.в}}$ — масса ричстакера, находящаяся на стороне, противоположной положению груза относительно вертикали точки опоры;

$l_{\text{р.в}}$ — плечо массы ричстакера, находящаяся на стороне, противоположной положению груза относительно вертикали точки опоры.

Координаты центра тяжести ричстакера с различным положением стрелы получить невозможно без подробной технической документации, однако очевидно, что перемещение части массы со стороны восстанавливающего момента на сторону момента опрокидывающего по мере увеличения вылета стрелы (рис. 3) имеет характер степенной функции:

$$m_{\text{р.опр}} = f(ak^c),$$

где k — номер ряда контейнера;

a и c — коэффициенты функции, специфичные для каждой модели ричстакера.

Поскольку в зависимости от номера ряда опрокидывающий момент, создаваемый контейнером ($m_k l_k$), имеет линейный характер, а опрокидывающий момент, создаваемый частью ричстакера ($m_{\text{р.опр}} l_{\text{р.опр}}$), — характер степенной функции, их совместное действие также имеет характер степенной функции. Так как масса опрокидывающая отличается от массы предельно допустимой на некоторую постоянную величину запаса устойчивости, специфичную для каждой модели ричстакера, функцию зависимости предельно допустимой массы груза от ряда контейнера также можно описать степенной функцией.

При отсутствии технической документации, но наличии данных о допустимых нагрузках зависимость допустимой массы контейнера можно определить выражением

$$m_{\text{доп.}i} = m_{\text{доп.}1} - (ak_i^c - 1),$$

где $m_{\text{доп.}i}$ — допустимая масса контейнера в i -м ряду;

$m_{\text{доп.}1}$ — допустимая масса контейнера в 1-м ряду.

При использовании формулы (4) в практических расчетах коэффициенты a и c подбираются эмпирическим способом, исходя из технических характеристик грузоподъемности, указанных изготовителем перегрузочной техники. Например, для ричстакеров CVS Ferrari серии F500 [27] эти коэффициенты примут значения, приведенные в таблице.

Коэффициенты a и c в зависимости от технических характеристик грузоподъемности перегрузочной техники

Модель	Грузоподъемность ричстакера в зависимости от размещения контейнера в штабеле			Коэффициенты	
	1-й ряд	2-й ряд	3-й ряд	a	c
CVS FERRARI F500-RS1	45	27	13	40	0,535
CVS FERRARI F500-RS2	45	31	16	11,8	1,128
CVS FERRARI F500-RS3	45	33	17	6,111	1,565
CVS FERRARI F500-RS5	45	36	19	2,39	2,252
CVS FERRARI F500-RS6	45	39	21	0,72	3,218

На основании найденных значений этих коэффициентов были построены графики зависимости допустимой массы контейнера от номера ряда целевого контейнера при выборке через ряды (рис. 4).

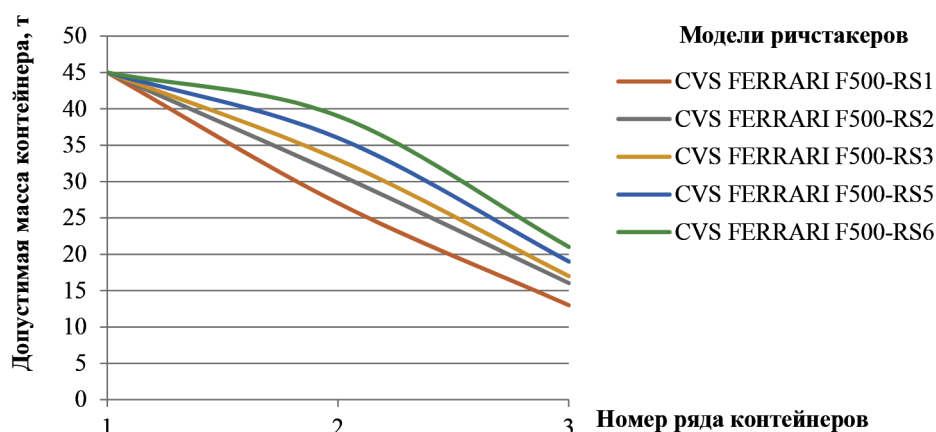


Рис. 4. Графики зависимости допустимой массы контейнера от номера ряда целевого контейнера при выборке через ряды

При грузовых операциях с контейнерами на ж/д платформах оценивать допустимую массу контейнера удобнее по расстоянию от места остановки ричстакера до центра тяжести контейнера, выраженному в метрах (рис. 5, а). Это может иметь значение не только при снятии контейнера с платформы, но и при его погрузке на платформу из штабеля. В этом случае будет решаться обратная задача, а именно определение максимально допустимого плеча, т. е. расстояния, на которое необходимо приблизиться, при допустимой массе контейнера (рис. 5, б). Превышение допустимого расстояния может привести к опрокидыванию ричстакера.

Высота штабелирования рассматриваемых ричстакеров заявлена «1 над 5 = 6·8'6"», что означает, что в 1-м ряду они могут штабелировать шесть ярусов, во 2-м ряду — пять, а в 3-м ряду — четыре яруса. Однако это только геометрическая доступность обработки контейнеров через ряды, обеспеченная максимальной длиной вылета стрелы (см. рис. 1). Определяющим критерием возможности работы через ряды является *допустимая масса контейнера* (см. рис. 4).

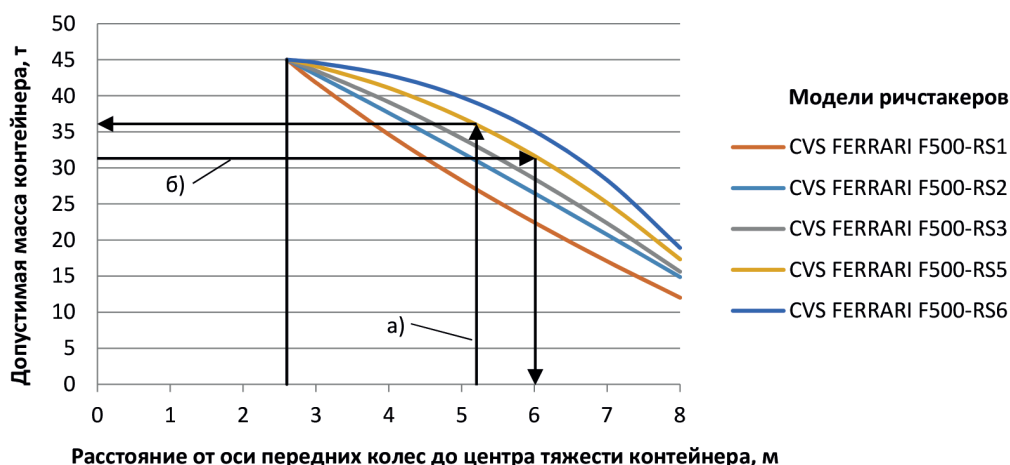


Рис. 5. Графики зависимости между допустимой массой контейнера и горизонтальной проекцией расстояния между осью передних колес ричстакера и центром тяжести контейнера:
а — определение допустимой массы при заданном расстоянии;
б — определение допустимого расстояния при заданной массе

Другой погрузочной машиной, альтернативной ричстакеру, является погрузчик со сменным навесным оборудованием [27]. Для обработки груженых контейнеров используются погрузчики со спредами верхнего захвата. Такие погрузчики работают только с ближним рядом штабеля.

Для доступа к контейнеру в глубине штабеля требуется выемка всех контейнеров, расположенных в блокирующем стеке.

Высота штабелирования погрузчика определяется высотой подъема каретки со спредером, а максимальная грузоподъемность является величиной постоянной для всех ярусов штабеля, поскольку плечо опрокидывающего момента контейнера l_k от высоты не зависит (рис. 6): $M_{опр} = m_k l_k$.

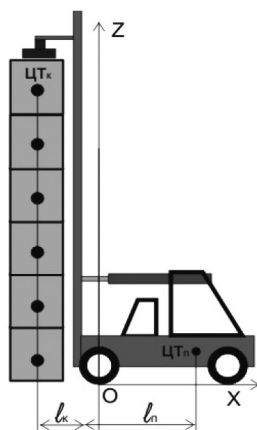


Рис. 6. Зависимость устойчивости погрузчика от местоположения контейнера

Работа через ряды при выполнении технологической операции расформирования операционного штабеля является технологическим преимуществом перегружателя типа ричстакер по сравнению с автопогрузчиком со спредером верхнего захвата. Однако при выемке контейнера из среднего ряда штабеля без разбора блокирующих стеков необходимо учитывать технические допуски ричстакера по весу контейнера и геометрической досягаемости. Графики, приведенные на рис. 2 и 4, позволяют оценить возможности ричстакера извлечь целевой контейнер из штабеля, работая через ряды. График, представленный на рис. 5, дает возможность установить связь между весом контейнера и максимально допустимой дистанцией, на которой ричстакер может поднимать или опускать контейнер.

Результаты (Results)

Увеличивающийся грузопоток через морские контейнерные терминалы явился причиной появления проблемы нехватки площадей для промежуточного хранения контейнеров. Поскольку расширение площади зоны хранения на работающем терминале, как правило, невозможно, проблему можно устранить с помощью решения ряда частных задач, среди которых выбор оптимальной конфигурации (прямоугольная или ступенчатая) штабеля контейнеров [13]. Данный выбор напрямую зависит от используемого перегрузочного оборудования, а также схем выемки целевого и блокирующих контейнеров.

Существуют две альтернативные технологические схемы расформирования штабеля, зависящие от применяемого оборудования:

- 1) выемка целевого контейнера с полной выборкой блокирующих стеков и ярусов;
- 2) выемка целевого контейнера с выборкой блокирующих ярусов и работой через ряды.

Схема работы с полной разборкой части штабеля до открытия доступа к целевому контейнеру позволяет формировать прямоугольный штабель с количеством ярусов, доступных для обработки погрузочными машинами. В качестве погрузочных машин в такой схеме могут использоваться как ричстакеры, так и погрузчики. Поскольку в данной схеме погрузочная машина работает только с ближним стеком, продвигаясь в глубину штабеля по мере выборки стеков, количество операций, выполняемых ричстакерами и погрузчиками в ней, одинаково.

Схема работы с частичной разборкой штабеля и выемкой целевого контейнера через ряды, предполагающая использование ричстакеров, требует формирования ступенчатого штабеля с умень-

шающимся количеством ярусов по мере удаления ряда с целевым контейнером (рис. 7) из-за длины вылета стрелы (рис. 2). В этом случае емкость штабеля уменьшается на 20 % по сравнению с классическим прямоугольным штабелем. В случае применения погрузчика со спредером верхнего захвата ступенчатый штабель обрабатывается по схеме — работа с только ближним стеком и продвижение в глубину штабеля по мере выборки стеков. Количество операций, выполняемых погрузчиком в этом случае, больше, чем у ричстакера. Сформировать ступенчатый штабель, если предполагается использовать на терминале одновременно и ричстакеры и погрузчики, из-за потери емкости штабеля, нецелесообразно.

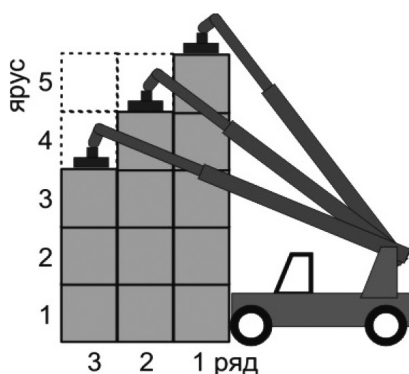


Рис. 7. Формирование штабеля под схему работы ричстакера через ряды (ступенчатая форма штабеля)

Рассмотрим вновь прямоугольный штабель, но с двумя альтернативными схемами его расформирования. Схема работы с полной разборкой части штабеля до открытия доступа к целевому контейнеру (работа с только ближним стеком и продвижение в глубину штабеля по мере выборки стеков) выполняется погрузчиком со спредером верхнего захвата, альтернативная схема (работа по возможности, через ряды) — выемка целевого контейнера и снятие блокирующих контейнеров поярусно выполняются ричстакером. Количество операций, выполняемых ричстакерами и погрузчиками в этих схемах, в общем случае различается и зависит от ряда, в котором расположен целевой контейнер (рис. 8).

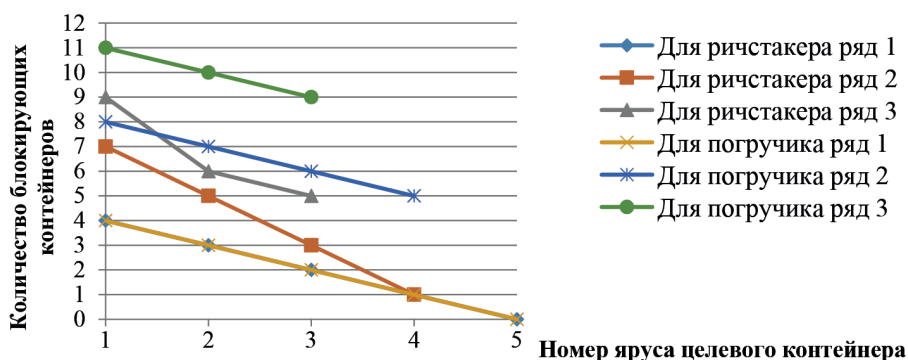


Рис. 8. Количество блокирующих контейнеров (в штабеле 1/5–2/4–3/3) в зависимости от места целевого контейнера при работе погрузчика, полностью разбирающего штабель, и ричстакера, работающего через ряды

Выполнив сравнение графиков на рис. 8, можно сделать следующие промежуточные выводы:

1. Количество операций с контейнерами 1-го ряда у ричстакера и погрузчика не отличается.
2. Количество операций с контейнерами 2-го ряда у ричстакера меньше, чем у погрузчика, на 1–4 контейнера в зависимости от яруса расположения целевого контейнера в стеке.
3. Количество операций с контейнерами 3-го ряда у ричстакера меньше, чем у погрузчика на 2–4 контейнера в зависимости от яруса расположения целевого контейнера в стеке.

Обсуждение (Discussion)

При сравнении эффективности использования ричстакеров и погрузчиков следует учитывать, что контейнеры 1-го ряда, где количество операций этих типов машин не различается, составляют 41,7 % объема штабеля. Кроме того, работа через ряды для ричстакера возможна лишь с относительно «легкими» грузами (рис. 5). Если, например, в 3-м ряду окажется контейнер с массой, превышающей допустимую, то штабель придется частично разбирать для продвижения машины вперед к целевому контейнеру. Иными словами, ричстакер потеряет в этом случае свое технологическое преимущество (работу через ряды), и «рисунок» технологической схемы будет аналогичен работе погрузчика со спредером верхнего захвата.

Теоретически существует возможность изначально формировать штабель временного хранения для ричстакера по принципу «тяжелые» контейнеры помещаем в ряды, располагающиеся ближе к технологическому проезду, «легкие» — в середину (в третий ряд от проезда) — см. рис. 7. Такое размещение контейнеров в штабеле позволит учесть технические допуски ричстакера по весу контейнера при его работе через ряды (см. таблицу с. 608), однако полностью не решит проблему аварийной остановки операции выемки контейнера из штабеля ввиду превышения веса изымаемого контейнера, так как среди недобросовестных грузоотправителей существует практика занижения веса груза в контейнере путем предоставления недостоверных сведений в сертификате VGM [28]. Наличие фактов недостоверного декларирования веса позволяет сделать вывод, что гарантировать отсутствие в штабеле контейнеров с массой, превышающей допустимую, не представляется возможным.

Наличие возможности аварийной остановки операции выемки контейнера из штабеля при работе ричстакера через ряды является проблемным фактором для цели данного исследования, так как нарушается один из важных принципов автоматизации: *принцип «безотладочной» технологии*. Согласно этому принципу автоматизировать технологический процесс можно только в том случае, если он (процесс) при выполнении не требует отладки на рабочих позициях. Аварийная остановка ричстакера при подъеме условно «тяжелого» контейнера приведет к необходимости отладки процесса на рабочей позиции, следовательно, технологическая схема с работой через ряды непригодна для автоматизации.

Технологическая схема работы с полным разбором блокирующих стеков и продвижением внутри штабеля перегружателя проигрывает в плане увеличения количества непроизводительных операций при выемке целевых контейнеров, при этом имеет несколько важных преимуществ. Во-первых, универсальность — подходит для выполнения как ричстакером, так и погрузчиком со спредером верхнего захвата. Во-вторых, «безотладочная» технология — касаясь колесной парой стека при подъеме контейнера, перегружатель берет максимальный заявленный изготовителем вес, т. е. устраняется возможность аварийного прерывания технологической операции. В-третьих, нечувствительность к емкости штабеля, т. е. отсутствие технологических ограничений на высоту и ширину формируемых в зоне хранения контейнерных штабелей при сохранении технических ограничений и следовательно, допустимые нагрузка на покрытие площадки и высота подъема каретки со спредером для автопогрузчика или длина стрелы ричстакера.

Выводы (Summary)

На основании выполненного исследования сделаны следующие выводы:

1. Выполнение технологической операции расформирования операционного штабеля осуществляется с использованием двух технологических схем, различающихся между собой типом используемого перегрузочного оборудования (ричстакер или погрузчик со спредером верхнего захвата) и способом исполнения (работа через ряды с частичным разбором блокирующих стеков или работа с ближним рядом с полным разбором блокирующих стеков).

2. Каждая из рассмотренных схем имеет как преимущества, так и недостатки. С технологической точки зрения (критерий минимизации непроизводительных операций перегрузочного оборудования) более эффективной является схема применения ричстакера с частичным разбором

блокирующих стеков и выемкой контейнеров через ряды, однако для нее невозможно гарантировать выполнение принципа «безотладочной» технологии, важного для автоматизации любых технологических процессов. Следовательно, в рамках данного исследования преимущество имеет схема применения ричстакера или погрузчика со спредером верхнего захвата с полным разбором блокирующих стеков и выемкой контейнеров только из ближнего ряда.

3. Преимуществами выбранной технологической схемы расформирования контейнерного штабеля в рамках автоматизации рабочего цикла автопогрузчика являются: универсальность, «безотладочная» технология исполнения и нечувствительность к емкости штабеля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белозерцева Н. П. Тенденции и трансформации на Дальневосточном рынке контейнерных перевозок в 2022 году: особенности и противоречия / Н. П. Белозерцева, М. Е. Брылева // Логистика: форсайт-исследования, профессия, практика: материалы III Национальной научно-образовательной конференции: в 2 ч., Санкт-Петербург, 28 октября 2022 года. — СПб.: Санкт-Петербургский государственный экономический университет, 2022. — Т. Часть 1. — С. 291–296.

2. Логистический коллапс. Морские перевозки, текущая ситуация и варианты выхода // Военное обозрение [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://topwar.ru/193587-logisticheskij-kollaps-morskie-perevozki-tekuschaja-situacija-i-varianty-vyhoda.html> (дата обращения: 20.04.2023).

3. Грузопотоки через российские порты меняют направление // Морские вести России [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.morvesti.ru/analitika/1688/96309/> (дата обращения: 20.04.2023).

4. РЖД направили в Минтранс предложение о перепрофилировании портов Дальнего Востока // PortNews [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://portnews.ru/news/328357/> (дата обращения: 24.04.2023).

5. Кудрявцева Т. Д. Об определении перерабатывающей способности контейнерных терминалов / Т. Д. Кудрявцева, Д. Н. Куклев // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. — 2020. — № 2 (23). — С. 18–20.

6. Тимошек Е. С. Аналитический обзор моделей и методов в управлении работой флота / Е. С. Тимошек, Т. Е. Маликова // Эксплуатация морского транспорта. — 2021. — № 4 (101). — С. 38–51. DOI: 10.34046/aumsuomt101/7.

7. Хлебородов В. С. Анализ эффективности существующих систем организации контейнерных терминалов при использовании различного транспортно-грузового оборудования / В. С. Хлебородов, С. Н. Корнилов // Современные проблемы транспортного комплекса России. — 2012. — Т. 2. — № 1. — С. 238–251.

8. Азимов Ф. К. Методика расчёта рациональных параметров контейнерного депо / Ф. К. Азимов, Д. И. Илесалиев, А. В. Цыганов // Современные проблемы транспортного комплекса России. — 2021. — Т. 11. — № 1. — С. 41–53. DOI: 10.18503/2222-9396-2021-11-1-41-53.

9. Расулов М. Х. Определение вместимости контейнерного терминала, обслуживаемого ричстакером / М. Х. Расулов, Ш. Р. У. Абдувахитов, Д. И. Илесалиев // Инновационный транспорт. — 2019. — № 1 (31). — С. 35–39. DOI: 10.20291/2311-164X-2019-1-35-39.

10. Янченко А. А. Алгоритм оформления судна в порту по технологии предварительного информирования таможенных органов в условиях свободного порта Владивосток / А. А. Янченко, Т. Е. Маликова, А. В. Кузьмин // Территории опережающего социально-экономического развития в Российской Федерации и свободный порт Владивосток: сборник научных трудов X Региональной научной конференции, посвященной 25-летию ФТС России, Владивосток, 05–06 октября 2016 года. — Владивосток: Владивостокский филиал Российской таможенной академии, 2016. — С. 257–262.

11. Кузнецов А. Л. Селективность контейнеров в различных транспортно-технологических схемах / А. Л. Кузнецов, А. Д. Семенов, А. А. Радченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 672–682. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-672-682.

12. Соловьева Е. Е. Исследование подходов в разработке алгоритмов управления автоматизированной системой организации поиска и выемки контейнеров / Е. Е. Соловьева // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Пятой международной научно-технической конференции, Петропавловск-Камчатский, 18–21 октября 2022 года. — Петропавловск-Камчатский: Камчатский государственный технический университет, 2022. — С. 70–74.

13. Гомбосэд С. Техническое оснащение контейнерных площадок / С. Гомбосэд, О. Б. Маликов // Современные проблемы транспортного комплекса России. — 2013. — Т. 3. — № 1. — С. 7–16.
14. Соловьева Е. Е. Оптимизация работы тыловых грузовых фронтов морских контейнерных терминалов: технологический аспект / Е. Е. Соловьева // Актуальные проблемы развития судоходства и транспорта: Материалы Национальной научно-технической конференции с международным участием, Владивосток, 16–17 ноября 2022 года. — Владивосток: Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 2022. — С. 146–153.
15. Kuznetsov A. The Influence of the Storage Strategy on the Complexity of the Container Selection Procedure / A. Kuznetsov, A. Kirichenko, O. Izotov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2018. — Vol. 171. — No. 1. — Pp. 012046. DOI: 10.1088/1755-1315/171/1/012046.
16. Маликова Т. Е. Организация таможенного контроля на контейнерных терминалах в морских пунктах пропуска / Т. Е. Маликова // Проблемы транспорта Дальнего Востока: FERBAT-13: материалы юбилейной десятой международной научно-практической конференции, посвященной 200-летию адмирала Г. И. Невельского, Владивосток, 02–04 октября 2013 года. — Владивосток: Российская академия транспорта, Дальневосточное отделение, 2013. — С. 81–83.
17. Радочинская А. Ж. Моделирование процесса обработки импортного грузопотока на контейнерном терминале в среде MATLAB / А. Ж. Радочинская, А. А. Янченко, Т. Е. Маликова // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: Сборник докладов Второй Международной научной конференции, Санкт-Петербург, 14–22 апреля 2021 года. — СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2021. — С. 144–149. DOI: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-144-149.
18. Маликова Т. Е. Анализ процесса формирования таможенного логистического потока на контейнерном терминале / Т. Е. Маликова, Ю. В. Гришина // Проблемы транспорта Дальнего Востока: FERBAT-13: материалы юбилейной десятой международной научно-практической конференции, посвященной 200-летию адмирала Г. И. Невельского, Владивосток, 02–04 октября 2013 года. — Владивосток: Российская академия транспорта, Дальневосточное отделение, 2013. — С. 217–218.
19. Малышев Н. В. К вопросу роботизации тыловых контейнерных терминалов / Н. В. Малышев, Е. К. Коровяковский // Бюллетень результатов научных исследований. — 2020. — № 1. — С. 15–25. DOI: 10.20295/2223-9987-2020-1-15-25.
20. Оськин Д. А. Система с переменной структурой для управления манипуляционным роботом / Д. А. Оськин, М. Е. Дьяченко // Вестник Морского государственного университета. — 2016. — № 75. — С. 54–56.
21. Маликова Т. Е. Детерминированный конечный автомат поиска контейнеров в штабеле / Т. Е. Маликова, Е. Е. Соловьева, А. Ж. Радочинская // Эксплуатация морского транспорта. — 2022. — № 4 (105). — С. 91–100. DOI: 10.34046/aumsuomtl05/11.
22. Маликова Т. Е. Склады и складская логистика / Т. Е. Маликова. — М.: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство ЮРАЙТ», 2021. — 157 с.
23. Малышев Н. В. Перспективы безлюдных технологий на контейнерных терминалах / Н. В. Малышев, Е. К. Коровяковский // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2019): труды Восьмой научно-технической конференции, Москва, 21 ноября 2019 года. — М.: Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте», 2019. — С. 244–247.
24. Dyda A. A. Robot dynamics identification via neural network / A. A. Dyda, D. A. Oskin, A. V. Artemiev // 2015 IEEE 8th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS). — IEEE, 2015. — Vol. 2. — Pp. 918–923. DOI: 10.1109/IDAACS.2015.7341437.
25. Оськин Д. А. Решение обратной задачи кинематики для манипуляционного робота методом штрафных функций / Д. А. Оськин, А. А. Дыда // Фундаментальные исследования. — 2015. — № 11–4. — С. 673–677.
26. Маликова Т. Е. Автоматизация рабочего цикла погрузчика на механизированном контейнерном терминале / Т. Е. Маликова, Е. Е. Соловьева, А. Ж. Радочинская // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: Четвертая Международная научная конференция, Санкт-Петербург, 4–21 апреля 2023 года. — СПб.: Санкт-Петербургский гос. ун-т аэрокосмического приборостроения, 2023. — Ч. 1. — С. 220–224. DOI: 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-220-224.

27. Ричстакеры CVS Ferrari [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.cvsferrarius.ru/richstakery/> (дата обращения: 10.04.2023).

28. Тонконог В. В. Проблемные вопросы занижения веса груза в контейнерах, перемещаемых морским транспортом / В. В. Тонконог, Е. В. Филатова, Т. В. Головань // Путеводитель предпринимателя. — 2018. — № 40. — С. 268–288.

REFERENCES

1. Belozertseva, N. P., and M. E. Bryleva. “Trends and transformations in the far eastern container transportation market in 2022: features and contradictions.” *Logistika: forsajt-issledovaniya, professiya, praktika: materialy III Nacional'noy nauchno-obrazovatel'noy konferencii*. Vol. 1. SPb.: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj ekonomicheskij universitet, 2022. 291–296.

2. “Logisticheskii kollaps. Morskie perevozki, tekushchaya situatsiya i varianty vykhoda.” *Voennoe obozrenie*. Web. 20 Apr. 2023 <<https://topwar.ru/193587-logisticheskij-kollaps-morskie-perevozki-tekushchaya-situatsiya-i-varianty-vykhoda.html>>.

3. “Gruzopotoki cherez rossiiskie porty menyayut napravlenie.” *Morskie vesti Rossii*. Web. 20 Apr. 2023 <<https://www.morvesti.ru/analitika/1688/96309/>>.

4. “RZhD napravili v Mintrans predlozhenie o pereprofilirovanii portov Dal'nego Vostoka.” *PortNews*. Web. 24 Apr. 2023 <<https://portnews.ru/news/328357/>>.

5. Kudryvtseva, Tat'yana Dmitrievna, and Denis Nikolaevich Kuklev. “Determining processing capacity of container terminals.” *Transport of the Asia-Pacific Region* 2(23) (2020): 18–20.

6. Timoshek, E. S., and T. E. Malikova. “Analytical review of models and methods in fleet management.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4(101) (2021): 38–51. DOI 10.34046/aumsuomtl01/7.

7. Khleborodov, V. S., and S. N. Kornilov. “Analiz effektivnosti sushchestvuyushchikh sistem organizatsii konteynernykh terminalov pri ispol'zovanii razlichnogo transportno-gruzovogo oborudovaniya.” *Modern Problems of Russian Transport Complex* 2.1 (2012): 238–251.

8. Azimov, F. K., D. I. Ilesaliev, and A. V. Tsyganov. “Methodology for calculating the rational parameters of a container depot.” *Modern Problems of Russian Transport Complex* 11.1 (2021): 41–53. DOI: 10.18503/2222-9396-2021-11-1-41-53.

9. Rasulov, Marufdjan X., Shahboz R. Abduvahitov, and Daurenbek I. Ilesaliev. “Defining the capacity of the container terminal served by a reach staker.” *Innotrans* 1(31) (2019): 35–39. DOI: 10.20291/2311-164X-2019-1-35-39.

10. Yanchenko, A. A., T. E. Malikova, and A. V. Kuzmin. “The algorithm for ship clearance at port according to the technology of preliminary informing customs authorities under the conditions of the free port of Vladivostok.” *Territorii operezhayushchego sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya v Rossiiskoi Federatsii i svobodnyi port Vladivostok: sbornik nauchnykh trudov X Regional'noi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 25-letiyu FTS Rossii*. Vladivostok: Vladivostokskii filial Rossiiskoi tamozhennoi akademii, 2016. 257–262.

11. Kuznetsov, Aleksandr L., Anton D. Semenov, and Anna A. Radchenko. “Box selectivity in different container cargo-handling systems.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 672–682. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-672-682.

12. Soloveva, E. E. “Research of approaches in the algorithms development for managing an automated system for organizing the search and seizure of containers”. *Tekhnicheskaya ekspluatatsiya vodnogo transporta: problemy i puti razvitiya: Materialy Pyatoy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii*. Petropavlovsk-Kamchatskij: Kamchatskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2022. 70–74.

13. Gombosed, S., and O. B. Malikov. “Technical equipment of container yards.” *Modern Problems of Russian Transport Complex* 3.1 (2013): 7–16.

14. Solovyova, Ekaterina E. “Optimization of operation of rear cargo fronts of sea container terminals: technological aspect.” *Aktual'nye problemy razvitiya sudokhodstva i transporta: Materialy Natsional'noi nauchno-tehnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*. Vladivostok: Dal'nevostochnyi gosudarstvennyi tekhnicheskii rybokhozyaistvennyi universitet, 2022. 146–153.

15. Kuznetsov, A., A. Kirichenko, and O. Izotov. “The Influence of the Storage Strategy on the Complexity of the Container Selection Procedure.” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 171. No. 1. IOP Publishing, 2018. DOI: 10.1088/1755-1315/171/1/012046.

16. Malikova, T. E. “Organization of customs control in container terminals at maritime crossing points.” *Problemy transporta Dalnego Vostoka. FEBRAT-2013: materialy yubileinoi desyatoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 200-letiyu admirala G. I. Nevel'skogo*. Vladivostok, 2013. 81–83.

17. Radochinskaia, A. Zh., A. A. Yanchenko, and T. E. Malikova. "Simulation of the Import Bound Cargo Traffic Processing at a Container Terminal in MATLAB Environment." *Aerokosmicheskoe priborostroenie i ekspluatatsionnye tekhnologii. Sbornik dokladov Vtoroj Mezhdunarodnoj nauchnoj konferentsii*. SPb., 2021. 144–149.
18. Malikova, T. E., and Iu. V. Grishina. "Customs logistic flow procedure analysis in a container terminal." *Problemy transporta Dalnego Vostoka. FEBRAT-2013: materialy yubileinoi desyatoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 200-letiyu admirala G. I. Nevelskogo*. Vladivostok, 2013. 217–218.
19. Malyshev, N. V., and E. K. Korovyakovskiy. "Robotic automation of logistics container terminals." *Bulletin of scientific research results* 1 (2020): 15–25. DOI: 10.20295/2223-9987-2020-1-15-25.
20. Os'kin, D. A., and M.E. D'yachenko. "Sistema s peremennoj strukturoj dlya upravleniya manipulyacionnym robotom." *Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta* 75 (2016): 54–56.
21. Malikova, T. E., E. E. Soloveva, and A. Zh. Radochinskaia. "Deterministic finite state machine for search of containers in stack." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4(105) (2022): 91–100. DOI: 10.34046/aumsuomt105/11.
22. Malikova, T. E. *Sklady i skladskaya logistika*. M.: Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennost'yu "Izdatel'stvo YuRAIT", 2021.
23. Malyshev, N. V., and E. K. Korovyakovskii. "Perspektivy bezlyudnykh tekhnologii na konteynernykh terminalakh." *Intellektual'nye sistemy upravleniya na zhelezнодорожном транспорте. Komp'yuternoe i matematicheskoe modelirovanie (ISUZhT-2019): trudy Vos'moi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. M.: Aktsionernoe obshchestvo "Nauchno-issledovatel'skii i proektno-konstruktorskii institut informatizatsii, avtomatizatsii i svyazi na zhelezнодорожном транспорте", 2019. 244–247.
24. Dyda, Alexander A., Dmitry A. Oskin, and Andrey V. Artemiev. "Robot dynamics identification via neural network." *2015 IEEE 8th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*. Vol. 2. IEEE, 2015. 918–923. DOI: 10.1109/IDAACS.2015.7341437.
25. Oskin, D. A., and A. A. Dyda. "Inverse kinematics problem for manipulator robot by penalty function method." *Fundamental research* 11–4 (2015): 673–677.
26. Malikova, T. E., E. E. Soloveva, and A. Zh. Radochinskaia. "Loader work cycle automation at the mechanized container terminal." *Aerokosmicheskoe priborostroenie i ekspluatatsionnye tekhnologii: Chetvertaya Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya*. SPb.: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet aerokosmicheskogo priborostroeniya, 2023. 220–224. DOI: 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-220-224.
27. Richstakery CVS Ferrari. Web. 10 Apr. 2023 <<http://www.cvsferrarius.ru/richstakeryi/>>.
28. Tonkonog, V. V., E. V. Filatova, and T. V. Golovan. "Problems of underestimation of the weight of the load in containers, moved by sea transport." *Entrepreneur's Guide* 40 (2018): 268–288.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ганнесен Виталий Витальевич — доцент
 Дальневосточный государственный технический
 рыбохозяйственный университет
 690087, Российская Федерация, г. Владивосток,
 ул. Луговая, д. 52-Б
 e-mail: gannesen.vv@dgtru.ru

Маликова Татьяна Егоровна —
 доктор технических наук, доцент
 Морской государственный университет имени
 адмирала Г. И. Невельского
 690059, Российская Федерация, г. Владивосток,
 Верхнепортовая, 50 а
 e-mail: Malikova@msun.ru

Петрова Екатерина Евгеньевна —
 старший преподаватель
 Дальневосточный государственный технический
 рыбохозяйственный университет
 690087, Российская Федерация, г. Владивосток,
 ул. Луговая, д. 52-Б
 e-mail: pillers@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gannesen, Vitalii V. —
 Associate Professor
 Far Eastern State Technical Fisheries University
 52-B Lugovaya Str., Vladivostok, 690087,
 Russian Federation
 e-mail: gannesen.vv@dgtru.ru

Malikova, Tatiana E. —
 Dr. of Technical Sciences, associate professor
 Maritime State University named after
 Admiral G. I. Nevelskoi
 50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690059,
 Russian Federation
 e-mail: Malikova@msun.ru

Petrova, Ekaterina E. —
 Senior Lecturer
 Far Eastern State Technical
 Fisheries University
 52-B Lugovaya Str., Vladivostok, 690087,
 Russian Federation
 e-mail: pillers@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11 мая 2023 г.
 Received: May 11, 2023.

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-617-632

OPPORTUNISTIC NAVIGATION APPLIED TO INTEGRATION OF ALTERNATIVE POSITIONING AND ELECTRONIC MAPPING BASED ON SPLINE TECHNOLOGY

I. V. Yuyukin

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

The problem of vulnerability and local incapacity of global satellite navigation systems is formulated. The expediency of alternative positioning methods to create a precedent for high-precision location determination in the satellite-denied environment is revealed. The hypothesis about the impossibility of a separate alternative to meet the requirements of full autonomy of modern navigation when it is necessary to comprehensively solve geolocation scenarios based on the combinatorics of various technologies is put forward. An assumption about the probable advantage of combining data from several information sources to compensate for the disadvantages of each option when predicting an increase in the overall reliability and accuracy of navigation parameters is made. An opportunistic navigation paradigm with the objective function of obtaining location information from mixing additional radio frequency signals with simultaneous visualization of a spline positioning map to determine the location inside a graphic fragment is proposed. The confidence that the approach from the standpoint of spline functions expands the horizon of possibilities of the concept of opportunistic navigation from the purely technical synergetics of the landscape of «signals of opportunity» to the creation of a perspective positioning system using effective electronic mapping is expressed. It is determined that the positioning accuracy of navigation systems is practically necessary to build an optimal trajectory for the safe routing of the vessel. Attention is focused on understanding the optimality of the trajectory as a multi-way planning strategy within the framework of the «receding horizon» paradigm with the obligatory condition that a waypoint with a user-defined probability is achievable by a moving object. It is noted that the modeling of optimal trajectories is implemented by a method similar to the technology of interpolation of navigation contours based on the composition of a B-spline with the provision of an attribute parameter to maintain the same value at each point as a result of the analysis of the spatial anisotropy of the source data. The synthesis of three-dimensional spreading of magnetic map anomalies has been tested to create a mapping standard based on a hybrid approximation algorithm as an implementation of a method for computer rendering a geometric primitive of a function of two variables. The postulate of increasing the potential of high-precision localization of the position of any mobile object in space is interpreted, provided that the ontology of opportunistic navigation is applied in practice as the realization of situational awareness of interdependent technical systems in order to maximize the reliability of observation.

Keywords: satellite-denied environment, opportunistic navigation, technical synergetics, “signals of opportunity”, “receding horizon”, spatial anisotropy, computer rendering, situational awareness.

For citation:

Yuyukin, Igor V. “Opportunistic navigation applied to integration of alternative positioning and electronic mapping based on spline technology.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 617–632. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-617-632.

УДК 656.61.052 656

ОППОРТУНИСТИЧЕСКАЯ НАВИГАЦИЯ В АСПЕКТЕ ИНТЕГРАЦИИ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ И ЭЛЕКТРОННОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ СПЛАЙНОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

И. В. Ююкин

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

Сформулирована проблема уязвимости и локальной недееспособности глобальных систем спутниковой навигации. Выявлена целесообразность применения альтернативных способов позиционирования

для создания прецедента высокоточного определения местоположения в среде спутниковой недоступности. Выдвинута гипотеза о невозможности отдельной альтернативы удовлетворить требованиям полной автономии современной навигации при необходимости комплексного решения сценариев геолокации на основе комбинаторики различных технологий. Допущено предположение о преимуществе объединения данных из нескольких источников информации для компенсации недостатков каждого варианта при прогнозировании повышения общей надежности и точности навигационных параметров. Предложена парадигма оппортунистической навигации с целевой функцией получения информации о местоположении из микширования дополнительных радиочастотных сигналов с одновременной визуализацией сплайновой карты позиционирования для определения местонахождения внутри графического фрагмента. Вычислительным экспериментом доказано, что подход с позиций сплайн-функций расширяет горизонт возможностей концепции оппортунистической навигации от сугубо технической синергетики ландшафта «сигналов возможностей» до создания перспективной системы позиционирования при помощи эффективного электронного картографирования. Определено, что точность позиционирования навигационных систем практически необходима для построения оптимальной траектории для безопасной маршрутизации судна. Акцентировано внимание на понимании оптимальности траектории как стратегии многоходового планирования в рамках парадигмы «отступающий горизонт» с обязательным условием достижимости подвижным объектом путевой точки с заданной пользователем вероятностью. Отмечается, что моделирование оптимальных траекторий реализуется методом, аналогичным технологии интерполирования навигационных изолиний на основе композиции В-сплайна с обеспечением сохранения атрибутивным параметром одинакового значения в каждой геометрической точке, как результат анализа пространственной анизотропии исходных данных. Апробировано синтезирование трехмерного спрединга аномалий магнитной карты для создания эталона картографирования на основе гибридного алгоритма аппроксимации как реализация способа компьютерного рендеринга навигационной изоповерхности. Интерпретирован постулат повышения потенциала высокоточной локализации положения любого мобильного объекта в пространстве при условии применения на практике онтологии оппортунистической навигации как реализации ситуационной осведомленности о взаимозависимых технических системах с целью максимального обеспечения надежности обсервации.

Ключевые слова: среда спутниковой недоступности, оппортунистическая навигация, техническая синергетика, сигналы возможностей, отступающий горизонт, пространственная анизотропия, компьютерный рендеринг, ситуационная осведомленность.

Для цитирования:

Ююкин И. В. Оппортунистическая навигация в аспекте интеграции альтернативного позиционирования и электронного картографирования на основе сплайновой технологии / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 617–632. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-617-632.

Введение (Introduction)

Несмотря на большие достижения в области глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) присущее им ограничение относительной слабости сигналов космического базирования делает их сравнительно легко блокируемыми. Это создает прецедент недостаточной надежности спутниковой навигации в любое время в любом географическом месте, особенно во внутренних помещениях урбанизированной инфраструктуры, глубоких городских уличных «каньонах» и средах, подверженных вредоносным атакам в виде преднамеренных помех. Городская дорожная среда, включающая высотные здания, может значительно снизить точность и доступность спутниковых сигналов [1].

Проблема локальной недееспособности глобальных систем навигации является особенно актуальной для служб экстренного реагирования, поскольку более 70 % телефонных вызовов исходят из закрытых помещений. Экспериментальное исследование показало, что доступность GPS в комбинации с ГЛОНАСС и Galileo реализуется только для 44 % городской среды Гонконга по главным дорогам каньонного типа, при этом общим требованием является достижение реальной точности определения координат в городских условиях от 1 до 10 м [2]. Условная доступность спутниковых сигналов создает дополнительную проблему для будущих интеллектуальных транспортных систем, требующих надежного, последовательного и защищенного от несанкционированного доступа позиционирования.

Погрешность определения местоположения увеличивается при работе спутникового приемоиндикатора в городских условиях. Проблемное позиционирование в закрытых помещениях в условиях высокой урбанизации фактически является явным «пробелом» в глобальной навигации, с которым GPS в настоящее время не справляется, и использование альтернативных возможностей является одним из потенциальных способов восполнить этот пробел. В настоящее время растет спрос на модификацию приложений спутниковой навигации в городских условиях на основе *метода радиоотпечатков*. Этот инновационный способ непрерывной геолокации основан на измерении уровней сигналов в определенных заранее точках закрытого помещения, которое предварительно производится специалистом в фазе настройки. В фазе навигации выполняется оценка местоположения мобильного подвижного объекта путем сопоставления измерений, проведенных в разных фазах. Перспективный метод позволяет достичь точности локализации порядка 2,5–3 м [3].

В последние два десятилетия предложено несколько технических подходов для устранения ограничения навигации на основе ГНСС. Эти подходы обычно объединяют выходные данные фиксированного числа хорошо смоделированных разнородных датчиков, в частности спутниковых приемоиндикаторов, инерциальных навигационных систем и баз данных цифровых карт, со специализированными алгоритмами обработки сигналов с целью обеспечения надежного позиционирования. Гарантированное фиксирование местоположения всегда ассоциировалось с задачей навигации быстрого и безопасного перемещения судна из одной точки в другую. Навигация не только необходима в современной жизни, степень ее развития оказывает непосредственное влияние на увеличение возможности надежного и точного перемещения в любом месте и в любое время автономных транспортных средств. Около 1 трлн долл. европейской экономики в 2014 г. оказалось в зависимости от точной навигации с помощью GPS [4].

С целью нивелирования проблем ГНСС предлагается новая парадигма для судовождения с целью преодоления ограничений спутниковой навигации. Концепция, получившая название *оппортунистической навигации*, предназначена для извлечения информации о местоположении из микширования всех дополнительно возможных радиочастотных сигналов с параллельной визуализацией высокоточной карты ландшафта многообразия сигналов. Новый подход к преодолению ограничений глобальной навигации заключается в комплексировании приемников ГНСС с широким спектром радиочастотных сигналов в качестве дополнительной навигационной информации. Когнитивная оппортунистическая навигация рассматривает все сигналы как потенциал позиционирования: от обычных сигналов GPS до сигналов связи, традиционно не предназначенных для использования в качестве источников позиционирования, таких как сигналы сотовой связи, точки доступа Wi-Fi и Bluetooth, цифровое или аналоговое телевидение, амплитудно-частотно-модулированное радио-, видеонаблюдение и мультиплексированный радар.

Портативные радиоприемники так называемой оппортунистической навигации непрерывно осуществляют поиск подходящих по характеристикам сигналов, из которых можно извлечь дополнительную прогностическую информацию о местоположении подвижного объекта в режиме реального времени. Ни одна отдельная альтернатива не может удовлетворять современным требованиям полной автономии навигации. Для комплексного решения альтернативных сценариев позиционирования необходима комбинация технологий для полной реализации глобального надежного потенциала определения местоположения [5]. Добавление источников информации в гибридную архитектуру объективно создает прецедент повышения производительности глобальных навигационных систем. Ключевое преимущество объединения данных из нескольких источников заключается в том, что оно может компенсировать недостатки каждого источника, одновременно повышая общую надежность и точность прогнозируемых навигационных параметров [6].

Дополнительную информацию для позиционирования с помощью специфичных пиксельных измерений может раскрыть обычная фотография. Моментальный снимок окружающей местности дает подробную информацию о количестве света, падающего на каждый пиксель оптического датчика на транспортном подвижном объекте. Для того, чтобы определить местоположение пикселя во фрейме изображения, данные, относящиеся к каждому пикселю, практически связаны с его

координатами. Чтобы идентифицировать конкретные пиксели на изображении, соответствующие точкам транскрипции географического ландшафта, необходимо подключить оптический датчик к системе обработки изображений оппортунистической навигации. Положения этих пикселей из фотографии могут содержать геометрическую информацию, полезную для позиционирования. Поэтому видеокамеру также можно использовать в качестве источника дополнительной информации для определения местоположения при условии локального отсутствия спутниковой связи в аспекте реализации концепции оппортунистической навигации. Координаты мобильных объектов определяются путем преобразования координат из кадра видеокамеры в глобальный кадр, учитывая, что положение видеодатчика известно. Концепция видеонаблюдения аналогична визуальной навигации по ориентирам, где пространственная ориентация фиксируется зрительным образом по приметным удаленным объектам. При использовании данного подхода в парадигме оппортунистической навигации имеются большие перспективы в возможности минимизации недостатков классического пеленгования, которое и в современных условиях имеет определенное значение в прибрежном плавании.

Для организации оппортунистической навигации в принципе не требуется построения специальной технической инфраструктуры. Классические сигналы уже сейчас передаются для других полезных целей и поэтому они, по сути, фактически «бесплатны» для пользователя оппортунистической навигации. Достижения в области радиотехники делают оппортунистическую навигацию технически выполнимой в условиях современности. Относительно недавние усовершенствования в области радиотехники установили целесообразность создания радиоприемника, который одновременно принимает и обрабатывает данные множества различных сигналов. Например, уже существуют примеры программно-определяемых когнитивных радиостанций в целях традиционной связи, которые способны во избежание помех по мере необходимости автоматически переключать частоты. Данный тип возможностей, безусловно, является наиболее перспективным для использования в оппортунистической навигации.

В классическом понимании типичную среду оппортунистической навигации необходимо рассматривать как перспективный ландшафт радиочастотных сигналов, внутри которого приемник GPS определяет свое местоположение в пространстве и времени с извлечением дополнительной информации по обратному контуру на основе перемещения информационных выборок с высокой частотой дискретизации от эталона к мобильному приемнику. Вариативная структура оппортунистической навигации с использованием сигналов нескольких спутниковых созвездий на низкой околоземной орбите на основе доплеровских измерений частоты может обеспечить надежные показатели точности определения местоположения. Согласно полученным экспериментальным результатам, позиционирование приемника только с помощью пяти низкоорбитальных спутников реализуется с погрешностью конечного положения, составляющей 22,7 м [7].

Глобальные спутниковые системы приближаются к практическому пределу производительности в классическом контексте. Большой выигрыш возможен за пределами традиционных орбит ГНСС. Спутниковое созвездие с низкой околоземной орбитой в течение длительного времени рассматривалось как перспективная, но дорогостоящая система, требующая больших группировок для быстрых навигационных решений. Появление коммерческих широкополосных сообщений от спутников на низких орбитах побуждает к изучению их двойного назначения: как для связи, так и для вторичной службы позиционирования и синхронизации.

Лаборатория восприятия, разведки и навигации автономных систем в сотрудничестве с военно-воздушными силами США провела масштабную кампанию по анализу сигналов сотовой связи в оппортунистической среде на разных высотах в Южной Калифорнии. Было обнаружено, что сигналы от передатчиков сотовой связи могут надежно приниматься и отслеживаться в навигационных целях приемниками, установленными на высокочастотных самолетах, летающих на высотах до 23000 футов на расстоянии до 100 км. Результаты дополнительного эксперимента оценки потенциала сотового варианта оппортунистической навигации для траектории протяженностью 51 км со стандартным пролетом за 9 мин показали, что трехмерное местоположение высотных воздушных судов оценивается среднеквадратичной погрешностью, равной 10,5 м [8].

Объединение сигналов ГНСС с техническими возможностями сотовой связи 5G гарантирует, что вероятность ошибки определения местоположения ограничивается минимизированием риска целостности стратегии оппортунистической навигации. Эмпирические данные позиционирования наземного транспортного средства, осуществляющего оппортунистическую навигацию с помощью программно-определяемого приемника 5G на траектории протяженностью 1,02 км, пройденной за 100 с, показывают, что среднеквадратичная ошибка определения местоположения составляет 14,9 м [9]. Экспериментальные результаты, демонстрирующие работу беспилотного летательного аппарата (БПЛА) с использованием комбинированной платформы, гарантируют снижение конечной ошибки локализации с 55 м до 6 м после 30 с преднамеренной имитации недоступности сигналов GPS потребительского класса [10].

Расширенное толкование парадигмы оппортунистической навигации позволяет применить концептуальный потенциал кибернетической безопасности к судовождению как автономному процессу в комбинации с искусственным интеллектом для мотивации создания высокоточного позиционирования в среде отсутствия GPS [11]. Архитектура принятия сопряженных решений искусственного интеллекта в условиях неопределенности может базироваться на основе объединения разнородных данных оппортунистической навигации за счет формирования теоретико-игрового понятия минимизации «цены анархии» при совместном синтезировании ландшафта сигналов от нескольких взаимодополняющих разнородных источников информации [4].

В ходе практической реализации исследования сформулированы следующие задачи:

1. Анализ уязвимости современных ГНСС как неадекватности из-за подверженности помехам, спуфинг-атакам, глушению спутниковых сигналов.
2. Аналитический обзор проблематики оппортунистической навигации с акцентом на предложение реальной инновационной альтернативы GPS.
3. Рассмотрение вопроса оптимальности траектории на основе алгоритма *B*-сплайнового интерполирования навигационных изолиний как реализация постулата «отступающий горизонт» в парадигме оппортунистической навигации.
4. Исследование феномена наблюдаемости как потенциальной оцениваемости различных состояний среды оппортунистической навигации посредством изучения ландшафтного пространства многообразия «сигналов возможностей».
5. Рассмотрение применимости в судовождении платформы оппортунистической навигации в задаче одновременной локализации и графического отображения движения судна на базе синтеза картографического эталона позиционного географического окружения с определением местонахождения внутри фрагмента карты на основе привязки к измерительному результату.
6. Формирование точки зрения расширения горизонта возможностей концепции оппортунистической навигации для создания надежных элементов перспективной системы позиционирования в судовождении на основе интеграции локализации и эффективного электронного картографирования.
7. Адаптация гибридного алгоритма двумерной аппроксимации под концепцию оппортунистической навигации с целью моделирования спрединга «сигналов возможностей» для обеспечения трехмерного картографирования.
8. Модификация прикладных паскаль-программ применительно к парадигме оппортунистической навигации на основе использования перспективных методов сплайн-функций.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Точность позиционирования навигационных систем практически необходима для геометрического построения оптимальной траектории движения любого подвижного объекта с целью безопасного следования по выбранному маршруту. Эффективная траектория полета надежным способом синтезируется в области динамического поля точности отечественной спутниковой навигационной системы ГЛОНАСС в качестве возможной новой технологии управления воздушным движением в Российской Федерации. Способ геометрического построения оптимальной траектории полета на фоне изменяющегося поля точности позиционирования позволяет обеспечить осведомленность

о ситуации воздушного движения и организовать гибкую маршрутизацию полета в контексте меняющейся воздушной обстановки, а, следовательно, в конечном итоге повысить базовую точность аэронавигационного обеспечения.

В структуре поля точности ГЛОНАСС существуют пространственные и временные вариации. Если на заданной траектории появляется запрещенная зона, то должна быть автоматически выбрана оптимизированная траектория, позволяющая избежать аварийной ситуации и безопасно привести к конечному пункту назначения, которая обеспечивает кратчайший путь. Если применяется критерий выбора оптимальной траектории, то обеспечивается сокращенный путь для дальнемагистральных рейсов. Например, для маршрута полета, который охватывает 5000 км, протяженность трассы сокращается на 60 км, что в условиях высокой интенсивности воздушного движения обеспечит отечественным авиакомпаниям значительный уровень экономии [12]. Аналогичным образом решается задача безопасной маршрутизации морского судна в рамках парадигмы эффективного планирования перехода.

Характеристики точности интегрированного навигационно-временного поля, создаваемого системой ГЛОНАСС, могут быть улучшены при функциональном дополнении стандартного созвездия спутников мобильным псевдоспутником. Методом сравнения результатов натурного эксперимента и математического моделирования выполнена оценка мультисистемного режима с функциональным дополнением в виде псевдоспутника. Особенность исследования состоит в размещении мобильного псевдоспутника на борту беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Для достижения максимальной точности позиционирования предполагалось решение задачи оптимизации траектории полета. В качестве положительного результата эксперимента по применению наукоемкой технологии необходимо отметить, что смещение траектории БПЛА на глиссаде уменьшалось с 80 м до 7 м, а точность интегрированного позиционирования повысилась на 5–7 % по сравнению с традиционным подходом [13].

Реальную оптимальность траектории обеспечивает стратегия многоцелевого планирования движения при условии достижимости подвижным объектом путевой точки с заданной пользователем вероятностью. Прогнозирование пространственной дислокации обеспечивает баланс между навигацией к путевой точке и снижением неопределенности оценки местоположения. Формулирование задачи оппортунистической навигации так называемым «наивным» способом направления мобильного транспортного средства непосредственно к путевой точке на практике в большинстве ситуаций приводит к невозможности финального достижения данной путевой точки из-за плохой оценки точности спутникового позиционирования [14]. Напротив, многоцелевое планирование в вероятностном смысле гарантирует ожидаемое прибытие в контрольную точку маршрута. Многоцелевой подход планирования траектории востребован во многих прикладных приложениях роботизированной навигации, таких как поисково-спасательные операции, исследование агрессивной окружающей среды и адекватное реагирование на стихийные бедствия.

Улучшенная схема сглаживания автоматизированной траектории действительно оптимальным образом реализуется на основе композиции *B*-сплайна, которая дополнительно уточняет траекторию и позволяет плавно управлять автономным роботизированным устройством [15]. Онтология улучшенной модели *B*-сплайна заключается в эффекте генерирования траектории по касательной к первоначальной линии пути с учетом непрерывности по кривизне, так что роботизированное транспортное устройство или БПЛА может своевременно получить плавную команду на рулевое управление для обеспечения следования по оптимально быстрому маршруту. Улучшенная модель гибким образом конфигурирует сглаженную сплайновую траекторию в зависимости от ограничений окружающей среды. Проведенные имитационные исследования подтверждают эффективность и надежность финитного сплайнового алгоритма. Чтобы эффективно сократить путь между путевыми точками маршрута предлагается применять метод *B*-сплайновой аппроксимации, позволяющий организовать последовательность поворотов для уклонения от конфликтных препятствий, что безопасно изменяет траекторию исходного пути, первоначально запланированного на основе интерфейса системы глобальной навигации.

Моделирование оптимальных сплайновых траекторий реализуется методом, аналогичным технологии интерполирования пространственных навигационных изолиний [16]. Под пространственной изолинией понимается условное изображение на плоской или трехмерной карте, представляющее собой линию, в каждой точке которой атрибутивный параметр сохраняет одинаковое значение как результат анализа пространственной анизотропии исходных данных [17]. Фактически набор изолиний в компьютерной визуализации представляет удобный способ рендеринга графического примитива как функции от двух переменных. Суть метода построения изолинии на основе сплайн-интерполяции сводится к расчету сегментных значений патчей координатной сетки на основе математической функции, которая минимизирует кривизну поверхности и определяет аппроксимирующую изоповерхность, проходящую в допустимом приближении от точек измерений. При этом в результате сплайнового приближения к исходной навигационной функции двух переменных каждая полученная пространственная интерполяционная кривая получается математически «гладкой», что подразумевает возможность ее успешной функциональной дифференцируемости в математическом смысле, обеспечивая в практическом приложении наглядную компьютерную визуализацию.

Предлагается синтезирование фрагмента картографирования на основе технологии сплайн-функций для обеспечения дополнительной информации для эталонной привязки как усиление парадигмы оппортунистической навигации [18]. Данный подход автоматически расширяет горизонт возможностей концепции оппортунистической навигации от сугубо технической синергетики ландшафта разнородных радиосигналов до создания надежных элементов перспективной системы определения места судна на основе эффективного электронного картографирования с целью достижения взаимодополняющих преимуществ альтернативного позиционирования.

Фактор наблюдаемости как потенциальной оцениваемости различных состояний среды оппортунистической навигации является важнейшим для прогностического сбора информации в неблагоприятных навигационных условиях при оптимизации траектории в парадигме многоступенчатой концепции «отступающий горизонт» [19]. Наблюдаемость связана с определением возможности последовательной оценки динамического состояния технической системы на основе набора наблюдений, проведенных за определенный период времени. Предполагается, что некий навигационный приемник функционирует в среде, состоящей из некоторого множества передатчиков. Получатель обладает минимальными априорными знаниями о своих собственных состояниях и состояниях среды оппортунистической навигации. Цель приемника состоит в том, чтобы создать карту ландшафта сигнала высокой точности, одновременно локализуясь внутри этой электронной карты в пространстве и времени. Парадигму «отступающий горизонт» можно метафорически представить как феномен «железной карты», причем условное «желе» ландшафтной карты сигналов образно становится тверже по мере того, как стабилизируется работа аппаратуры оппортунистической навигации [19].

Формирование динамического сигнального ландшафта оппортунистической навигации первоначально начинается с неполных знаний о местоположении и географическом окружении и заканчивается точным позиционированием с одновременным построением электронного фрагмента карты окружающей обстановки при гарантированном определении местоположения подвижного объекта внутри этой карты. Предполагается, что носитель бортового приемника способен контролировать свои маневры на базе достижений искусственного интеллекта при соблюдении минимальных условий, в которых окружающая среда является полностью наблюдаемой. Учитывается, что маневры, управляемые приемником, уменьшают минимальную априорную информацию об окружающей среде, необходимую для полной наблюдаемости. Для обеспечения безопасной навигации мобильного объекта ему предписывается эффективная траектория как выбор многошаговой стратегии предсказуемости в рамках реализации концепции «отступающий горизонт» с целью достижения улучшения качества картографирования и точности пространственно-временного позиционирования.

При оптимизации траектории в рамках концепции «отступающий горизонт» на определенном временном шаге вычисляется многоступенчатая перспективная оптимальная последовательность

управления. Однако применяется только первый шаг этой последовательности с опережением, в то время как остальная часть информационного каскада игнорируется. Это мотивировано тем обстоятельством, что на следующем временном шаге становится доступным новое оппортунистическое измерение, которое содержит дополнительную информацию для уточнения оптимальной траектории. Особенностью оппортунистической навигации является зависимость качества оценок не только от пространственной траектории, по которой мобильный объект пересекает окружающую среду, но также и от скорости, с которой он движется по оптимальной траектории. Это позволяет реализовать вопрос оптимизации архитектуры принятия решений посредством предоставления подвижным объектам возможности активно контролировать свои маневры с осознанным упрощением требований априорных знаний об окружающей среде при апостериорном нивелировании задачи полной наблюдаемости.

Основанный на оптимизации алгоритм планирования траектории с «отступающим горизонтом» для динамических систем, работающих в неструктурированных средах, позволяет реализовать стратегическую многоступенчатость в минимальном варианте в два этапа [20]. Предлагаемый подход представляет собой двухшаговую процедуру, которая использует алгоритм планирования движения на первом этапе для эффективного нахождения осуществимого, но, возможно, неоптимального номинального решения задачи планирования траектории, где, в частности, решаются комбинаторные аспекты задачи. Результирующая номинальная траектория затем улучшается на втором этапе планирования в парадигме «отступающего горизонта» на основе оптимизации, которая выполняет локальное уточнение траектории в течение скользящего временного интервала. На втором этапе номинальная траектория использует новый способ для представления конечного многообразия. Это обусловлено тем, что на следующем временном шаге становится доступным новое измерение, содержащее информацию, которая используется для уточнения оптимальной траектории. Двухшаговый подход дает возможность обеспечить теоретические гарантии с точки зрения рекурсивной осуществимости значения целевой функции к сходимости запланированного конечного состояния.

Представляется целесообразным для практического применения аналогичное авионике рассмотрение процесса построения оптимальной траектории движения морского судна в конфликтной среде с сигнальным ландшафтом оппортунистической навигации при использовании методов базисных сплайнов [21]. Цель оптимизации траектории в аспекте автоматизации судовождения состоит в том, чтобы предписать наблюдателю эффективное направление движения, по которому он должен следовать для того, чтобы поддерживать хорошие оценки состояний цели. Оптимизация траектории на основе принципа «отступающего горизонта» стратегически ориентирована на лучший результат по сравнению со случайными траекториями.

Результаты (Results)

Использование магнитного поля Земли в задачах оппортунистической навигации представляется перспективным направлением исследований в качестве инновационной альтернативы для глобальных систем позиционирования. Магнитная навигационная система способна консолидировать данные магнитометра в синергетике с разнообразными другими радиочастотными сигналами для определения текущего местоположения подвижной транспортной единицы в масштабе реального времени в среде недоступности ГНСС. Онтология оппортунистической навигации с использованием аномальных вариаций магнитного поля для постоянной геолокации движущихся объектов за счет применения нового принципа позиционирования посредством суммарного анализа данных, репродуцированных разнородными многочисленными бортовыми датчиками, абсолютно обеспечивает автономное местоопределение.

Базовая идея магнитной навигации заключается в мгновенном фиксировании координат любого подвижного объекта на основе сопоставления измеренных значений бортового магнитометра с компьютерной реализацией, вычисленной с использованием эталонной карты аномалий магнитного поля Земли. Магнитное поле практически используется в качестве геофизической

основы для создания трехмерных эталонов картографирования с возможностью их оптимального применения в целях позиционирования. Навигация по магнитным аномалиям демонстрирует высокоточный потенциал точности там, где GPS локально недоступны или не могут предоставлять информацию с необходимой современности точностью. Поскольку Земля обладает измеримым магнитным полем в любом месте и в любое время, данный факт позволяет считать контуры магнитной интенсивности надежным источником когнитивной навигации в качестве реальной спутниковой альтернативы. Высокая вариативная изменчивость магнитного поля Земли создает потенциальную возможность ориентирования по индивидуальной сигнатуре определенной географической местности. Использование свойств пространственных геофизических полей для автоматической коррекции траектории движения мобильного объекта может быть ориентировано на парадигму оппортунистической навигации.

Исследуемый инновационный метод характеризуется доступностью в любой точке мира в любое время, что дает основания сделать предположение о вероятности преодоления в ближайшем будущем многих существующих технических ограничений с перспективой его автономного использования как полноценной замены ГНСС. Важным аспектом успешной практической реализации магнитной навигации в парадигме оппортунистической навигации является формирование оптимального эталона картографирования как меры информативности, определяющей эффективность использования геофизического поля для точного позиционирования. Информативность магнитного поля практически определяется в виде бортовой электронной карты для географической «привязки». При этом перспективная навигация с коррекцией по специальной электронной карте реализуется в качестве последовательности мгновенных сопоставлений измерений магнитометра с эталоном информативности магнитного поля, хранящимся в памяти бортового компьютера. Новый вариант навигации необходимо понимать как процедуру «привязки» измерений к картографированному эталону на основе поиска глобального экстремума функционала корреляционного сравнения измеренного фрагмента с информативностью карты физических аномалий планетарного магнитного поля.

Представляется целесообразным для решения проблемы картографирования применение методов сплайн-функций. Конкретные результаты сплайнового подхода демонстрируются на основе трансформации экспериментального опыта в рамках проекта аэронавигационного применения аномалий магнитного поля Земли. В качестве показательного примера на рис. 1 представлена синтезированная трехмерная карта аномалий магнитной карты летных испытаний на высоте 300 м над территорией штата Вирджиния, представляющая практическую целесообразность как эталон картографирования на основе апробированного алгоритма двумерной *B*-сплайновой аппроксимации [22].

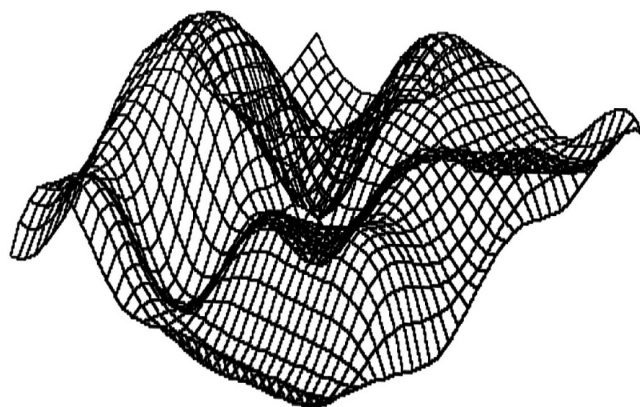


Рис. 1. Фрагмент спрединга сплайн-аппроксимированной карты магнитных аномалий в аспекте парадигмы оппортунистической навигации

Магнитная навигация обеспечивает информационный доступ к решению проблемы альтернативного позиционирования с нивелированием неточностей метода за счет использования

дополнительных радиочастотных измерений разнородной структуры оппортунистической навигации. В качестве цифровой сеточной основы сплайновой технологии использовалась матрица размером 9×9 при общем количестве 81 реперных координатных точек. С целью гладкого приближения перспективы карты магнитных аномалий использовались 36 добавочных точек по каждой координате на фрагментированном аппроксимационном полигоне. Дополнительные точки интерполяции выбирались каждый раз строго посередине сеточного интервала текущей расстановки сплайновых узлов по *схеме Марсдена*.

Точное позиционирование внутри помещений с использованием магнитного поля в рамках онтологии оппортунистической навигации является современным перспективным методом. Экспериментальные результаты демонстрируют, что инновационная модель магнитного позиционирования, которая может достигать точности 1 м, обладает хорошей надежностью при использовании подхода машинного обучения [23]. Статус задачи альтернативного автономного позиционирования, безусловно, возрастет в эпоху интернета. GPS локализует объекты, существующие снаружи, но не в полной мере подходит для локализации внутри помещений, поскольку распространению радиоволн препятствует инфраструктура.

Решение проблем определения высокоточного местоположения в любой точке земной поверхности средствами магнитной навигации может быть эффективно выполнено на основе физических измерений градиента аномалий магнитных вариаций планетарного поля бортовыми датчиками. Градиентный подход может позволить оптимальным способом смоделировать сложную в математическом отношении пространственную неоднородную структуру планетарного магнитного поля с целью точного позиционирования мобильных объектов на основе учета архитектуры изменчивости спектра ориентированности векторов градиентов. Веер сплайн-градиентов обеспечивает максимальную реалистичность восстановления изогеометрического дизайна местности за счет учета многофакторности вероятных направлений максимальных изменений магнитной аномалии, что реалистично формирует электронную изотропную перспективу геофизического рельефа стохастической природы [24].

Исследуемый инновационный магнитный метод характеризуется доступностью во всем мире в любое время, что дает основание сделать предположение о вероятности преодоления в ближайшем будущем многих существующих технических ограничений за счет использования обширного ландшафта сигналов оппортунистической навигации с перспективой полноценной замены ГНСС. Необходимость поиска дублирующей системы GPS дополнительно мотивирована наличием абсолютного разрешения спуфинговых и джамминговых ситуаций в аспекте реализации кибернетической осведомленности как важной составляющей безопасности морской и авиационной индустрии.

Обсуждение (Discussion)

Платформа оппортунистической навигации аналогична задаче одновременной локализации и визуализации в корреляционно-экстремальных навигационных системах, когда мобильный объект при анализе неполных знаний о своем местоположении и окружении синтезирует картографический эталон своего окружения и его местонахождение определяется внутри фрагмента карты. Непрерывная геолокация осуществляется на основе привязки к измерительному участку, согласно условию совпадения перспективы картографирования с измерительным результатом, при постоянном использовании различных бортовых датчиков по мере перемещения мобильного объекта в евклидовом пространстве. В отличие от картографирования окружающей навигационной среды сигнальный ландшафт классического понимания оппортунистической навигации ориентирован на динамичное применение концепции использования технического избытка возможностей схем модуляции радиочастотных сигналов в рамках концепции наблюдаемости при иерархической оценке неопределенностей окружающей среды.

В традиционном судовождении электронная карта автоматически загружается на монитор при фиксировании по координатам условного обозначения судна в границах данной карты. Пара-

дигма оппортунистической навигации аналогичным образом распространяет концепцию визуализации динамичного ландшафта радиочастотных сигналов в рамках одновременной интеграции навигации и картографирования. В англоязычной литературе для идентификации данной парадигмы используется аббревиатура SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). В 1986 г. технология семантического позиционирования и картографирования привлекла пристальное внимание многих исследователей, получив быстрое развитие в робототехнике и приложениях виртуальной реальности и областях применения искусственного интеллекта [25]. Алгоритм SLAM при использовании измерений аномальных магнитных вариаций Земли успешно модифицируется в аналогию MagSLAM, действующую в рамках общей концепции оппортунистической навигации с беспрецедентной точностью в 13 м при одновременной оценке корректности пути и самой карты [26].

Представляется перспективной стратегия обработки информации при совместной презентации данных коллаборативной оппортунистической навигации (COpNav) в виде так называемых «сигналов возможностей» в рамках объединенной системы «сотрудничества» GPS, радиосвязи и электронного картографирования. Этимология термина «сигналы возможностей» соотносится с практической реальностью использования для позиционирования сигналов, традиционно предназначенных для целей, отличных от задач навигации. В оппортунистической навигации несколько приемников обмениваются информацией для построения и непрерывного улучшения общего ландшафта сигналов, в пределах которого частоты локализуются в пространстве и времени. Интерпретация понимания системного уровня оппортунистической навигации представлена на рис. 2 в комбинации использования различных вариаций «сигналов возможностей» [27].

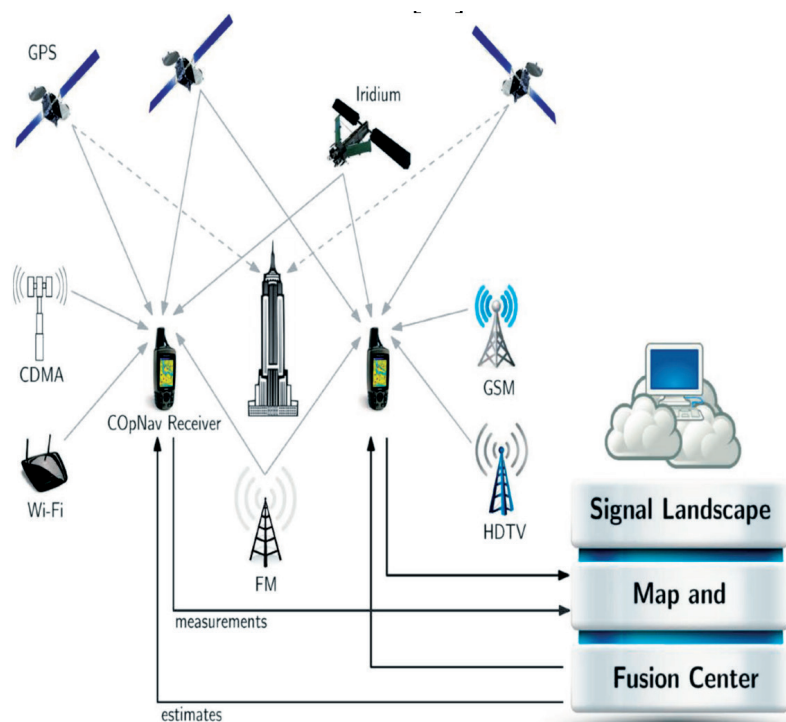


Рис. 2. Интерпретация системного уровня платформы оппортунистической навигации в реализации комбинирования «сигналов возможностей»

Портативные мобильные устройства как приемники оппортунистической навигации в вариативной реализации могут быть установлены на БПЛА или беспилотном наземном транспортном средстве для обеспечения микширования «сигналов возможностей» по традиционным сетям связи. Общие данные обрабатываются в объединенной базе данных (Signal Landscape Map), сформированной на основе виртуальной облачной технологии с целью синтеза сигнальной ландшафтной карты путем коллаборативного сбора информации об уровнях сигналов. Информация по обратному

контуру поступает из информационного центра слияния (Fusion Center) с тем, чтобы упростить отслеживание сигнала на каждом приемнике. По сравнению с парадигмой оппортунистической навигации сегмент управления GPS имеет ограничения, налагаемые точными предварительными оценками местоположения любого подвижного транспортного объекта. Операторы сотовой связи модулируют альтернативные сигналы с помощью множественного доступа с кодовым разделением (CDMA).

Сигналы системы низкоорбитальной спутниковой связи Iridium, наземных станций глобальной системы мобильной связи (GSM) и телевидения высокой четкости (HDTV) модулируются дополнительно с помощью множественного доступа с временным разделением. Точной временной синхронизации способствует наличие высокостабильных атомных часов на спутниках и на каждой наземной станции. В отличие от этого приемник COpNav, входящий в измененный ландшафт сигналов, может иметь меньше предварительной навигационной информации и не может принимать привязки атомарных частот. Пример, приведенный на рис. 2, демонстрирует функциональный характер «технического сотрудничества» оппортунистической навигации и сегмента управления GPS. Карта ландшафта сигнала и центр слияния данных поддерживают последние оценки общего состояния уникальной навигационной системы путем объединения наблюдений, сделанных приемниками оппортунистической навигации. Соответствующие оценки передаются обратно каждому получателю подвижного транспортного объекта.

В системном виде оппортунистическая навигация рассматривает все внешние сигналы как потенциальные «сигналы возможностей» от обычных сигналов ГНСС до сигналов связи, традиционно не предназначенных для использования в качестве источников синхронизации или позиционирования. Относительные временные и частотные смещения каждого сигнала, местоположение передачи и стабильность частоты оцениваются импровизированно по мере необходимости с использованием доступности предварительной информации. На уровне общности задача осведомленности оппортунистической навигации аналогична задаче одновременной локализации и визуального отображения карты позиционирования, представляющей особую популярность в робототехнике.

Ранее точность навигации в 5–10 м казалась оригинальной, в то время как предшествовавшие GPS варианты глобальной навигации обеспечивали точность порядка 1–2 км [28]. В течение двух последних десятилетий наметился ряд тенденций, которые позволили технически улучшить способность ориентироваться в любых условиях и в разных обстоятельствах. Несмотря на то, что GPS оценивается как прогрессивный фактор большинства этих тенденций, существуют ограничения классического спутникового позиционирования, которые со временем становятся все более очевидными по мере все большего ориентирования прогресса на навигацию. Это обуславливает необходимость развития отличных от ГНСС навигационных технологий. Теперь все чаще возникает пользовательское желание использовать ситуационную осведомленность о нескольких взаимозависимых системах с целью максимального обеспечения надежности обсервации.

В средах, где GPS подвергается помехам, атакам с глушением или подменой сигналов, оппортунистическая навигация может служить оптимальным альтернативным средством определения местоположения на основе использования потенциала «сигналов возможностей» [29]. В условиях современности кибернетическая атака на GPS становится абсолютной реальностью. Глобальные спутниковые системы оказываются все более подверженными глушению спутникового сигнала, а большинство приемников GPS уязвимы к подмене навигационных данных. При помощи несанкционированного применения специальных технических средств можно организовать специфичные *спуфинг-атаки*, искусственно вызывающие искажения реальной информации ГНСС. Спуфинг-технология основана на модуляции псевдослучайного кода с переориентированием судового приемоиндикатора от слабого спутникового сигнала на фальсифицированный сильный сигнал от злонамеренного источника [30].

Спутниковый сигнал позиционирования достаточно легко имитировать, поэтому кибернетическая безопасность GPS заслуживает внимания. Запрограммированные отклонения результатов навигационной локализации, вызванные фиктивной подменой, приведут к заранее заданному неправильному местоположению любых мобильных объектов. Абсолютное устранение проблемы возможно только при вариативном использовании такого альтернативного средства позициониро-

вания, как оппортунистическая навигация. Реальным шагом повышения потенциала высокоточной фиксации положения любого мобильного объекта в пространстве может явиться применение на практике парадигмы оппортунистической навигации на основе микширования «сигналов возможностей» с реализацией их расшифровки когнитивным способом.

Выводы (Summary)

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Факты недееспособности современных ГНСС мотивируют на поиск альтернативных методов позиционирования и рассмотрение возможностей оппортунистической навигации применительно к задачам судовождения.

2. Аналитический обзор проблематики оппортунистической навигации показал применимость перспективной парадигмы позиционирования в судовождении как дополнение структуры GPS традиционными радиосигналами, что не опровергает стратегическую осведомленность глобальной системы спутникового позиционирования, а усиливает инновациями классические возможности глобальной непрерывной геолокации.

3. Исследование феномена альтернативной системы позиционирования необходимо акцентировать на синтез возможностей оппортунистической навигации и одновременного электронного картографирования с приоритетом на моделирование сплайнового эталона информативности по аналогии инновационного обеспечения корреляционно-экстремальной навигации.

4. Сформирована точка зрения об эффективности построения оптимальной траектории на основе возможностей *B*-сплайнов в рамках многоступенчатой концепции «отступающий горизонт» как потенциальная оцениваемость точности позиционирования коллаборативной навигации.

5. Апробирование сплайнового алгоритма под задачу оппортунистической навигации показало положительные результаты по точности и быстродействию расчетов.

6. Модификация пакета прикладных паскаль-программ применительно к задаче трехмерной визуализации картографической составляющей оппортунистической навигации на основе использования гибридного алгоритма двумерной аппроксимации обеспечивает вычислительную устойчивость расчетных процедур.

7. Анализ преимуществ применения технологии когнитивной оппортунистической навигации подтвердил право использования в судовождении потенциала «сигналов возможностей» с целью расширения архитектуры средств искусственного интеллекта для усиления концепции A-Navigation.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lee H. Urban road safety prediction: A satellite navigation perspective / H. Lee, J. Seo, Z. Z. M. Kassas // IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine. — 2022. — Vol. 14. — Is. 6. — Pp. 94–106. DOI: 10.1109/MITS.2022.3181557.
2. Ji S. Potential Benefits of GPS/GLONASS/GALILEO Integration in an Urban Canyon — Hong Kong / S. Ji, W. Chen, X. Ding, Y. Chen, C. Zhao, C. Hu // The Journal of Navigation. — 2010. — Vol. 63. — Is. 4. — Pp. 681–693. DOI: 10.1017/S0373463310000081.
3. Щекотов М. С. SLAM-метод навигации внутри помещений на основе определения местоположения маяков Bluetooth / М. С. Щекотов // Информационные технологии и вычислительные системы. — 2021. — № 3. — Pp. 70–81. DOI: 10.14357/20718632210307.
4. Kassas Z. Analysis and synthesis of Collaborative Opportunistic Navigation Systems: Doctoral dissertation / Z. Kassas. — Austin: University of Texas, 2014. — 161 p.
5. Souli N. Online relative positioning of autonomous vehicles using signals of opportunity / N. Souli, P. Kolios, G. El-linas // IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. — 2021. — Vol. 7. — Is. 4. — Pp. 873–885. DOI: 10.1109/TIV.2021.3124727.
6. Mane S. Aspects on Aircraft Mapping and Navigation System: Theoretical Study / S. Mane // International Journal of Enhanced Research in Educational Development. — 2023. — Vol. 11. — Is. 1. — Pp. 286–290.
7. Orabi M. Opportunistic Navigation with Doppler Measurements from Iridium Next and Orbcomm LEO Satellites / M. Orabi, J. Khalife, Z. M. Kassas // 2021 IEEE Aerospace Conference (AERO). — IEEE, 2021. — Pp. 1–9. DOI: 10.1109/AERO50100.2021.9438454.

8. *Kassas Z. Z. M.* Assessment of cellular signals of opportunity for high-altitude aircraft navigation / Z. Z. M. Kassas, J. Khalife, A. Abdallah, C. Lee, J. Jurado, S. Wachtel, J. Duede, Z. Hoeffner, T. Hulsey, R. Quirarte, R. Tay // *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. — 2022. — Vol. 37. — Is. 10. — Pp. 4–19. DOI: 10.1109/MAES.2022.3187142.
9. *Abdallah A. A.* Assessing Real 5G Signals for Opportunistic Navigation / A. A. Abdallah, K. Shamaei, Z. M. Kassas // *Proceedings of the 33rd International Technical Meeting of The Institute of Navigation (ION GNSS+2020)*. — ION, 2020. — Pp. 2548–2559. DOI: 10.33012/2020.17702.
10. *Morales J. J.* Information Fusion Strategies for Collaborative Inertial Radio SLAM / J. J. Morales, J. J. Khalife, Z. M. Kassas // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. — 2021. — Vol. 23. — Is. 8. — Pp. 12935–12952. DOI: 10.1109/TITS.2021.3118678.
11. *Ююкин И. В.* Кибернетическая безопасность альтернативной автономной навигации с позиций сплайновой технологии / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 346–364. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-346-364.
12. *Skrypnik O. N.* Optimization of an aircraft flight trajectory in the GLONASS dynamic accuracy field / O. N. Skrypnik, E. E. Nechaev, N. G. Arefyeva, R. O. Arefyev // *Civil Aviation High Technologies*. — 2019. — Vol. 22. — Is. 5. — Pp. 19–31. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-5-19-31.
13. *Скрыпник О. Н.* Оптимизация траектории мобильного псевдоспутника для повышения точности интегрированного навигационно-временного поля ГЛОНАСС / О. Н. Скрыпник, Р. О. Арефьев // *Современные наукоемкие технологии*. — 2020. — № 2. — С. 51–58. DOI: 10.17513/snt.37914.
14. *Yang Y.* UAV Waypoint Opportunistic Navigation in GNSS-Denied Environments / Y. Yang, J. Khalife, J. J. Morales, Z. M. Kassas // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. — 2022. — Vol. 58. — Is. 1. — Pp. 663–678. DOI: 10.1109/TAES.2021.3103140.
15. *Sellers T.* A node selection algorithm to graph-based multi-waypoint optimization navigation and mapping / T. Sellers, T. Lei, C. Luo, G. Eu Jan, J. Ma // *Intelligence & Robotics*. — 2022. — Vol. 2. — Is. 4. — Pp. 333–354. DOI: 10.20517/ir.2022.21.
16. *Ююкин И. В.* Сплайн-интерполяция навигационных изолиний / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1026–1036. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1026-1036.
17. *Воробьев А. В.* Подход к обнаружению и устранению артефактов пространственных изолиний в приложениях Веб-ГИС / А. В. Воробьев, Г. Р. Воробьева // *Компьютерная оптика*. — 2023. — Т. 47. — № 1. — С. 126–136.
18. *Ююкин И. В.* Сплайновое синтезирование картографированного эталона информативности поля в задаче корреляционно-экстремальной навигации / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 25–39. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-25-39.
19. *Kassas Z. M.* Receding horizon trajectory optimization in opportunistic navigation environments / Z. M. Kassas, T. E. Humphreys // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. — 2015. — Vol. 51. — Is. 2. — Pp. 866–877. DOI: 10.1109/TAES.2014.140022.
20. *Bergman K.* An Optimization-Based Receding Horizon Trajectory Planning Algorithm / K. Bergman, O. Ljungqvist, T. Glad, D. Axehill // *IFAC-PapersOnLine*. — 2020. — Vol. 53. — Is. 2. — Pp. 15550–15557. DOI: 10.1016/j.ifacol.2020.12.2399.
21. *Ююкин И. В.* Оптимальная сплайн-траектория информативного маршрута судна в корреляционно-экстремальной навигации / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2022. — Т. 14. — № 2. — С. 230–247. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-230-247.
22. *Ююкин И. В.* Перспективная магнитная навигация с использованием метода сплайн-функций для оптимального формирования эталона картографирования / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2022. — Т. 14. — № 4. — С. 519–534. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-519-534.
23. *Sun M.* Indoor Geomagnetic Positioning Using the Enhanced Genetic Algorithm Based Extreme Learning Machine / M. Sun, Y. Wang, S. Xu, H. Yang, K. Zhang // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. — 2021. — Vol. 70. — Pp. 1–11. DOI: 10.1109/TIM.2021.3072699.
24. *Yuyukin I. V.* Configuring the fan of spline gradients when approximating the navigational isoline with a linear piecewise functional / I. V. Yuyukin // *Journal of Physics: Conference Series*. — IOP Publishing, 2021. — Vol. 2032. — № 1. — Pp. 012054. DOI: 10.1088/1742-6596/2032/1/012054.

25. Chen W. An Overview on Visual SLAM: From Tradition to Semantic / W. Chen, G. Shang, A. Ji, C. Zhou, X. Wang, C. Xu, Z. Li, K. Hu // *Remote Sensing*. — 2022. — Vol. 14. — Is. 13. — Pp. 3010. DOI: 10.3390/rs14133010.
26. Lee T. N. MagSLAM: Aerial simultaneous localization and mapping using Earth's magnetic anomaly field / T. N. Lee, A. J. Canciani // *Navigation*. — 2020. — Vol. 67. — Is. 1. — Pp. 95–107. DOI: 10.1002/navi.352.
27. Kassas Z. M. Collaborative opportunistic navigation / Z. M. Kassas // *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. — 2013. — Vol. 28. — Is. 6. — Pp. 38–41. DOI: 10.1109/MAES.2013.6533743.
28. Raquet J. Non-GNSS radio frequency navigation / J. Raquet, R. K. Martin // 2008 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. — IEEE, 2008. — Pp. 5308–5311. DOI: 10.1109/ICASSP.2008.4518858.
29. Kassas Z. M. I am not afraid of the GPS jammer: resilient navigation via signals of opportunity in GPS-denied environments / Z. M. Kassas, J. Khalife, A. A. Abdallah, C. Lee // *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. — 2022. — Vol. 37. — Is. 7. — Pp. 4–19. DOI: 10.1109/MAES.2022.3154110.
30. Ююкин И. В. Навигационное использование e-Logan в модификации с методом сплайн-функций / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 703–715. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-703-715.

REFERENCES

1. Lee, Halim, Jiwon Seo, and Zaher Zak M. Kassas. "Urban road safety prediction: A satellite navigation perspective." *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 14.6 (2022): 94–106. DOI: 10.1109/MITS.2022. 3181557.
2. Ji, Shengyue, Wu Chen, Xiaoli Ding, Yongqi Chen, Chunmei Zhao, and Congwei Hu. "Potential Benefits of GPS/GLONASS/GALILEO Integration in an Urban Canyon — Hong Kong." *The Journal of Navigation* 63.4 (2010): 681–693. DOI: 10.1017/S0373463310000081.
3. Shchekotov, M.S. "SLAM method of indoor navigation based on Bluetooth beacon localization." *Journal of Information Technologies and Computing Systems* 3 (2021): 70–81. DOI: 10.14357/20718632210307.
4. Kassas, Zaher. Analysis and synthesis of Collaborative Opportunistic Navigation Systems. Dr. Diss. Austin: University of Texas, 2014.
5. Souli, Nicolas, Panayiotis Kolios, and Georgios Ellinas. "Online relative positioning of autonomous vehicles using signals of opportunity." *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles* 7.4 (2022): 873–885. DOI: 10.1109/TIV.2021.3124727.
6. Mane, Shreya. "Aspects on Aircraft Mapping and Navigation System: Theoretical Study." *International Journal of Enhanced Research in Educational Development* 11.1 (2023): 286–290.
7. Orabi, Mohamad, Joe Khalife, and Zaher M. Kassas. "Opportunistic navigation with Doppler measurements from Iridium Next and Orbcomm LEO satellites." *2021 IEEE Aerospace Conference (AERO)*. IEEE, 2021. DOI: 10.1109/AERO50100.2021.9438454.
8. Kassas, Zaher Zak M., Joe Khalife, Ali Abdallah, Chiawei Lee, Juan Jurado, Steven Wachtel, Jacob Duede, Zachary Hoeffner, Thomas Hulsey, Rachel Quirarte, and RunXuan Tay. "Assessment of cellular signals of opportunity for high-altitude aircraft navigation." *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* 37.10 (2022): 4–19. DOI: 10.1109/MAES.2022.3187142.
9. Abdallah, Ali A., Kimia Shamaei, and Zaher M. Kassas. "Assessing Real 5G Signals for Opportunistic Navigation." *Proceedings of the 33rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+2020)*. ION, 2020. DOI: 10.33012/2020.17702.
10. Morales, Joshua J., Joe J. Khalife, and Zaher M. Kassas. "Information Fusion Strategies for Collaborative Inertial Radio SLAM." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 23.8 (2021): 12935–12952. DOI: 10.1109/TITS.2021.3118678.
11. Yuyukin, Igor V. "Cybernetic security of alternative offline navigation from the standpoint of spline technology." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.3 (2022): 346–364. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-346-364.
12. Skrypnik, Oleg N., Evgeniy E. Nechaev, Natalya G. Arefyeva, and Roman O. Arefyev. "Optimization of an aircraft flight trajectory in the GLONASS dynamic accuracy field." *Civil Aviation High Technologies* 22.5 (2019): 19–31. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-5-19-31.
13. Skrypnik, O. N., and R. O. Arefev. "Optimization of a mobile pseudolite track for increasing accuracy of the GLONASS integrated navigation-and-time field." *Modern High Technologies* 2 (2020): 51–58. DOI: 10.17513/snt.37914.
14. Yang, Yanhao, Joe Khalife, Joshua J. Morales, and Zaher M. Kassas. "UAV Waypoint Opportunistic Navigation in GNSS-Denied Environments." *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 58.1 (2022): 663–678. DOI: 10.1109/TAES.2021.3103140.

15. Sellers, Timothy, Tingjun Lei, Chaomin Luo, Gene Eu Jan, and Junfeng Ma. "A node selection algorithm to graph-based multi-waypoint optimization navigation and mapping." *Intelligence & Robotics* 2.4 (2022): 333–354. DOI: 10.20517/ir.2022.21.
16. Yuyukin, Igor V. "Spline interpolation of navigational isolines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1026–1036. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1026-1036.
17. Vorobev, Andrei Vladimirovich, and Gulnara Ravilevna Vorobeva. "An approach to detecting and eliminating spatial contour artifacts in Web GIS applications." *Computer Optics* 47.1 (2023): 126–136.
18. Yuyukin, Igor V. "Spline synthesis of the charted reference of the field informativity in mission correlation-extreme navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 25–39. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-25-39.
19. Kassas, Zaher M., and Todd E. Humphreys. "Receding horizon trajectory optimization in opportunistic navigation environments." *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 51.2 (2015): 866–877. DOI: 10.1109/TAES.2014.140022.
20. Bergman, Kristoffer, Oskar Ljungqvist, Torkel Glad, and Daniel Axehill. "An Optimization-Based Receding Horizon Trajectory Planning Algorithm." *IFAC-PapersOnLine* 53.2 (2020): 15550–15557. DOI: 10.1016/j.ifacol.2020.12.2399.
21. Yuyukin, Igor V. "Optimal spline trajectory of the ship informative route in the map-aided navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.2 (2022): 230–247. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-230-247.
22. Yuyukin, Igor V. "Perspective magnetic navigation with using the method of spline functions for optimal formation of the map-aided standard." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.4 (2022): 519–534. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-519-534.
23. Sun, Meng, Yunjia Wang, Shenglei Xu, Hongchao Yang, and Kewei Zhang. "Indoor Geomagnetic Positioning Using the Enhanced Genetic Algorithm Based Extreme Learning Machine." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 70 (2021). DOI: 10.1109/TIM.2021.3072699.
24. Yuyukin, I. V. "Configuring the fan of spline gradients when approximating the navigational isoline with a linear piecewise functional." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2032. No. 1. IOP Publishing, 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/2032/1/012054.
25. Chen, Weifeng, Guangtao Shang, Aihong Ji, Chengjun Zhou, Xiyang Wang, Chonghui Xu, Zhenxiong Li, and Kai Hu. "An Overview on Visual SLAM: From Tradition to Semantic." *Remote Sensing* 14.13 (2022): 3010. DOI: 10.3390/rs14133010.
26. Lee, Taylor N., and Aaron J. Canciani. "MagSLAM: Aerial simultaneous localization and mapping using Earth's magnetic anomaly field." *Navigation* 67.1 (2020): 95–107. DOI: 10.1002/navi.352.
27. Kassas, Zaher M. "Collaborative opportunistic navigation." *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* 28.6 (2013): 38–41. DOI: 10.1109/MAES.2013.6533743.
28. Raquet, John, and Richard K. Martin. "Non-GNSS radio frequency navigation." *2008 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. IEEE, 2008. DOI: 10.1109/ICASSP.2008.4518858.
29. Kassas, Zaher M., Joe Khalife, Ali A. Abdallah, and Chiawei Lee. "I am not afraid of the GPS jammer: resilient navigation via signals of opportunity in GPS-denied environments." *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* 37.7 (2022): 4–19. DOI: 10.1109/MAES.2022.3154110.
30. Yuyukin, Igor V. "Navigational use of e-Loran in modification with spline functions method." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 703–715. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-703-715.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ююкин Игорь Викторович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: uukiniv@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

Статья поступила в редакцию 28 апреля 2023 г.
Received: April 28, 2023.

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-633-645

INVESTIGATION OF STRUCTURAL-PHASE TRANSFORMATIONS OF WELD METAL AND IN THE HEAT-AFFECTED ZONE DURING LASER WELDING

N. V. Makarchuk¹, A. V. Makarchuk¹, V. N. Startsev²

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

² — NRC “Kurchatov Institute” — CRISM “Prometey”, St. Petersburg, Russian Federation

The use of laser equipment is one of the promising ways to create innovative and highly efficient technologies in the production of ship structures. The main advantages of using laser technologies in the production of marine equipment are increased productivity by increasing the speed and reducing the number of welding passes, improving the quality of welded joints due to the accuracy of the assembly of structures and the level of automation, reducing the level of residual stresses, warping and leach due to significant localization of the heating and penetration zone compared with arc welding technologies, a significant reduction in the consumption of welding materials or their complete exclusion due to the smaller dimensions of the geometry of the cutting edges and the width of the assembly gaps. The mechanical properties of the welded joint are determined by the composition of the steel and its structure. The structural-phase transformations of the weld metal are determined by the temperature-time parameters that occur in the seam zone itself and in the heat-affected zone. Laser welded joints are formed under conditions in which thermal cycles differ significantly in depth and width of the weld, so the mechanical properties of the joint are determined by local changes in the structure of the seam metal and heat-affected zone. The issues of formation of the phase composition of the seam zone and heat-affected zone during laser welding are examined in the paper. On the basis of numerical modeling of thermal processes and structural-phase transformations of weld metal and heat-affected zone accompanying laser welding, a method for quantifying the volume fraction of structural-phase components of weld metal and heat-affected zone is proposed. The proposed calculation algorithm avoids solving the equation for the amount of the volume fraction of the structural-phase components of the metal at each step of the calculations.

Keywords: mathematical model, laser welding, thermal cycle, heat-affected zone, weld microstructure.

For citation:

Makarchuk, Natalia V., Alexandra V. Makarchuk, and Vasilii N. Startsev. “Investigation of structural-phase transformations of weld metal and in the heat-affected zone during laser welding.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 633–645. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-633-645.

УДК 621.791

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ МЕТАЛЛА ШВА И ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ

Н. В. Макаrchук¹, А. В. Макаrchук¹, В. Н. Старцев²

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

² — НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Темой исследования являются вопросы формирования микроструктуры металла сварного шва и зоны термического влияния при лазерной сварке. Особое внимание уделяется термическим циклам сварки, проходящим в этих зонах, так как структурно-фазовые превращения металла шва определяются температурно-временными параметрами, которые происходят собственно в зоне шва и в зоне термического влияния.

Поскольку термические циклы существенно отличаются по глубине и ширине шва, то и механические свойства соединения будут определяться локальными изменениями структуры металла шва и околошовной зоны. Разработана математическая модель и исследованы вопросы формирования фазового состава зоны шва и зоны термического влияния при лазерной сварке. На основе численного моделирования тепловых процессов и структурно-фазовых превращений металла шва и зоны термического влияния, сопровождающих лазерную сварку, предлагается метод количественной оценки объемной доли структурно-фазовых составляющих металла шва и зоны термического влияния. Предложенный алгоритм расчета позволяет избежать решения уравнения для определения объемной доли структурно-фазовых составляющих металла на каждом шаге вычислений. Экспериментальные исследования подтвердили, что предлагаемый подход к проблеме количественной оценки объемной доли структурно-фазовых составляющих металла шва и зоны термического влияния позволяет прогнозировать соотношение фаз в различных точках лазерного сварного соединения.

Ключевые слова: математическая модель, лазерная сварка, термический цикл, зона термического влияния, микроструктура.

Для цитирования:

Макарчук Н. В. Исследование структурно-фазовых превращений металла шва и зоны термического влияния при лазерной сварке / Н. В. Макарчук, А. В. Макарчук, В. Н. Старцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 633–645. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-633-645.

Введение (Introduction)

Применение лазерного оборудования является одним из перспективных способов создания инновационных и высокоэффективных технологий в производстве судовых конструкций. Опыт его использования на крупнейших верфях Европы показывает большие возможности лазерного оборудования для создания прорывных технологий в судостроении [1]–[3]. Основными преимуществами применения лазерных технологий в производстве морской техники являются: повышение производительности за счет увеличения скорости и уменьшения числа проходов сварки, улучшение качества сварных соединений за счет точности сборки конструкций и уровня автоматизации, снижение уровня остаточных напряжений, коробления и поводов за счет значительной локализации зоны нагрева и проплавления по сравнению с дуговыми технологиями сварки, значительное уменьшение расхода сварочных материалов или их полное исключение за счет меньших размеров геометрии разделки кромок и ширины зазоров сборки.

Высокая концентрация энергии в сфокусированном луче лазера формирует специфическую форму зоны проплавления металла — широкую в верхней части и узкую, глубокую в средней и нижней частях шва. В целом лазерная сварка создает более узкие и глубокие сварные соединения, чем дуговые методы, а формирование лазерного шва проходит с более высокой скоростью нагрева и охлаждения. Механические свойства сварного соединения определяются составом стали и его структурой, структурно-фазовые превращения металла шва — температурно-временными параметрами, которые происходят, собственно, в зоне шва и в зоне термического влияния (ЗТВ). Поскольку лазерные сварные соединения формируются в условиях, при которых термические циклы существенно отличаются по глубине и ширине шва, механические свойства соединения определяются локальными изменениями структуры металла шва и околошовной зоны.

Кинетика распада аустенита, которая зависит от скорости его охлаждения, определяет формирующуюся микроструктуру металла шва и ЗТВ. По вопросам исследования и анализа структурных превращений аустенита, имеющим длительную историю, были получены значительные сведения теоретического и экспериментального характера [4]–[6], [8]. Диаграммы распада аустенита при охлаждении играют важную роль применительно к сварочным процессам. Существующие виды диаграмм: изотермические TTT-diagram, термокинетические CCT-diagram, анизотермические APA (welding TTT diagram), строятся на основе экспериментальных данных, полученных при различных условиях их проведения. Таким образом, для конкретной марки стали получают сведения о температурно-временной кинетике распада аустенита.

Дальнейшим развитием исследований явилось создание численных методов моделирования фазовых и структурных превращений, которые условно можно разделить на статистические (эмпи-

рические), основанные на анализе экспериментальных данных; моделирование физических явлений, происходящих при распаде аустенита; полуэмпирические модели, сочетающие как эмпирические части, так и частичное моделирование физических процессов распада аустенита [5]–[7], [9]. Применение данных моделей существенно упрощает задачу определения структурно-фазовых превращений в условиях сварки и прогнозирования микроструктуры сварного соединения. Однако данные модели в основном разработаны для дуговых методов сварки. В связи с этим возникает задача по исследованию и отработке метода прогнозирования структурно-фазовых изменений металла шва и ЗТВ при лазерной сварке для получения необходимых технологических свойств сварного соединения. Ранее было проведено моделирование формирования первичной макроструктуры сварного шва при лазерной сварке [10]. Данная статья, в которой рассмотрены вопросы формирования фазового состава зоны шва и ЗТВ при лазерной сварке, является продолжением работ по исследованию, отработке и адаптации методов и методик прогнозирования структурно-фазового состава сварного соединения.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В основе данного исследования численное моделирование тепловых процессов и структурно-фазовых превращений металла шва и ЗТВ, сопровождающих лазерную сварку. Тепловая модель лазерной сварки, используемая в исследовании, была разработана ранее при исследовании макроструктуры сварного соединения [10]. Здесь приведем лишь краткое ее изложение. На базе модели формирования парогазового канала в жидком металле (1), основанной на аппроксимации геометрической оптики и теплообмене при движении цилиндра в равномерном потоке, получены его глубина и остальные геометрические параметры:

$$(1-R) \frac{d_r}{d_z} + \text{cyl}(r \cdot \text{Pe}) \frac{(1-|z-s| \cdot \text{tg}(\gamma))^2}{r \cdot \text{Nu}} = 0; \quad (1)$$

$$\text{cyl}(x) = \frac{I_0(x)}{K_0(x)} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{I_n(x)}{K_n(x)},$$

где r — радиус парогазового канала;

z — глубина канала;

R — коэффициент отражения;

Pe — критерий Пекле;

Nu — критерий Нуссельта;

γ — полуугол схождения луча;

s — положение фокуса луча относительно поверхности детали;

I_0, I_n, K_0, K_n — функции Бесселя.

По известной геометрии канала рассчитывается тепловая доля энергии, которая расходуется на испарение металла и энергии лазерного излучения поглощенной через стенки свариваемыми деталями. Расчет тепловой картины при лазерной сварке выполняется по квазистационарной модели действия группы точечных источников, расположенных вдоль оси действия лазерного луча. Мощность каждого точечного источника определяется параметрами числа Пекле, соответствующими глубине канала в точке его расположения:

$$q(z_0, z_n) = \lambda(T_v - T_0) \cdot \int_{z_0}^{z_n} gg(\text{Pe}) dz; \quad (2)$$

$$gg(\text{Pe}) = 2,1995 + 6,2962 \cdot \text{Pe} - 0,4994 \cdot \text{Pe}^2 + 0,0461 \cdot \text{Pe}^3.$$

По рассчитанному полю температур определяется термический цикл в интересующей зоне шва или ЗТВ, скорости нагрева и охлаждения в ней:

$$T(r, x) - T_0 = \frac{q}{4\pi\lambda} \cdot \exp(-W \frac{x}{2\chi}) \cdot \sum_{j=-1,1} \frac{1}{r_j} \cdot \exp(-\frac{Wr_j}{2\chi}), \quad (3)$$

где $r_j = [x^2 + y^2 + (z - j \cdot \xi)^2]^{0,5}$ — радиус;

x, y, z — координаты рассматриваемой точки;

χ — температуропроводность;
 q — мощность точечного источника;
 ξ — координата точечного источника по Z ;
 T_0, T_v — начальная температура, температура испарения;
 W — скорость сварки;
 λ — теплопроводность металла.

Для адаптации и расчета термокинетических изменений структурно-фазового состава при лазерной сварке выбрана полуэмпирическая модель построения изотермических ТТТ диаграмм Kirkaldy — Li [11]–[14], содержащая достаточно большое количество входных параметров физического и эмпирического характера и их можно легко вычислять и регулировать. Время превращения τ объемной доли аустенита X при температуре T по этой модели имеет следующий вид:

$$\tau(X, T) = \frac{F(C, Mn, Si, Mo, \dots)}{\beta \cdot 2^{(G-1)/2} \cdot \Delta T^n \cdot \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)} \cdot \int_0^X \frac{dX}{X^{\frac{2(1-X)}{3}} \cdot (1-X)^{\frac{2X}{3}}}, \quad (4)$$

где τ — время;

X — объемная доля;

T — температура,

F — функция состава стали;

$\Delta T = (Ac_3, Ac_1, Bs - T)$ — переохлаждение;

n, β — эмпирические константы для каждой структурной фазы;

Q — энергия активации диффузии;

R — газовая постоянная;

G — размер аустенитного зерна (по ASTM);

Ac_3, Ac_1, Bs — критические точки начала ферритного, перлитного, бейнитного превращений.

Анализ экспериментальных данных [14] позволил определить для феррита, перлита и бейнита эмпирические зависимости функции состава стали:

$$\begin{aligned} F_F &= 59,6 \cdot Mn + 1,5Ni + 67,7Cr + 244Mo; \\ F_P &= 1,79 + 5,42(Cr + Mo + 4Mo \cdot Ni); \\ F_B &= (2,34 + 10,1C + 3,8Cr + 19Mo) \cdot 10^{-4} \cdot Z(X), \end{aligned} \quad (5)$$

где $Z = \exp[X^2(1,9C + 2,5Mn + 0,9Ni + 1,7Cr + 4Mo - 2,6)]$;

F, P, B — зоны структурных превращений (ферритное, перлитное, бейнитное), в которых выполняется расчет.

Значения химического состава стали выражены в процентах массовых долей. Объемная доля мартенсита X_M вычисляется по следующей зависимости [15], [16]:

$$X_M = X_A (1 - \exp(-k(Ms - T)^n)), \quad (6)$$

где $k = 0,0231 - 0,0105C + 0,0017Ni + 0,0074Cr - 0,0193Mo$;

$n = 1,4304 - 1,1836C + 0,7527C^2 + 0,0258Ni - 0,0739Cr - 0,3108Mo$;

X_A — массовая доля аустенита;

Ms — температура начала мартенситного превращения.

Задав значения температуры T и объемной доли превращения аустенита X , строим диаграмму его распада на каждую структурную фазу для данного состава стали. Основное противоречие использования ТТТ диаграмм для сварочных процессов заключается в том, что диаграмма построена в изотермических условиях, а структурно-фазовые превращения при сварке проходят при непрерывном охлаждении. Избежать этого можно в случае, если предположить, что в каждой точке термического цикла фазовые превращения происходят с такими же скоростями, как и в точках диаграммы, через которые проходит термический цикл. Такое допущение позволяет превратить расчет по изотермической ТТТ диаграмме в термокинетический.

Реализация данного допущения в расчете осуществляется по следующей схеме, которая для всех зон температурно-временного превращения аустенита имеет одинаковый вид. На ТТТ диа-

грамму наносится кривая охлаждения термического цикла. Температурный интервал термического цикла, проходящего через конкретную зону превращения, делится на n произвольных или равномерных частей. Выполняется расчет интервалов времени между последовательными точками. Уравнение (4) преобразуется так, чтобы значения X были вынесены в одну сторону уравнения (7), а остальные значения — в другую:

$$\int_0^X \frac{dX}{X^{\frac{2(1-X)}{3}} \cdot (1-X)^{\frac{2X}{3}}} = \frac{\beta \cdot 2^{(G-1)/2} \cdot \Delta T_i^n \cdot \exp\left(\frac{Q}{RT_i}\right)}{F(C, Mn, Si, Mo, \dots)_{F, P}} t_{j=i, i-1};$$

$$Z(X) \cdot \int_0^X \frac{dX}{X^{\frac{2(1-X)}{3}} \cdot (1-X)^{\frac{2X}{3}}} = \frac{\beta \cdot 2^{(G-1)/2} T_i^n \cdot \exp\left(\frac{Q}{RT_i}\right)}{F(C, Mn, Si, Mo, \dots)_B} \cdot t_{j=i, i-1}.$$

где $F(C, Mn, Si, Mo)$ — функции с индексом рассчитываемой зоны, соответствующие уравнениям (5).

Нетрудно заметить, что искомая величина X зависит от параметра, которым является правая часть уравнения. Поэтому для того чтобы не решать это уравнение несколько раз на каждом шаге, поступим следующим образом: решим левую часть отдельно, задавая величину X от 0 до 1 и определяя значение параметра. Полученный результат расчета аппроксимируем зависимостью значения X от величины параметра кубическим сплайном. Кривая термического цикла также аппроксимируется кубическим сплайном. Это позволяет уйти от дискретного сеточного деления шагов теплового расчета, задавая произвольный шаг, что упростит предельный переход.

Подставляя рассчитанные значения правой части уравнения (7) в аппроксимацию, X сплайном находим его величину. Для каждого значения температуры T_i на кривой термического цикла вычисляется приращение объемной доли ΔX_i образующейся фазы на временном шаге $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$:

$$\Delta X_i = |X(T_i, t_i) - X(T_i, t_{i-1})|, \quad (8)$$

где T_i, t_i, t_{i-1} — параметры правой части уравнения (7).

Количество объемной доли X_Σ образующейся фазы определяется суммированием всех приращений и предельным переходом:

$$X_\Sigma = \lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ \Delta t \rightarrow 0}} \sum_{i=0}^n \Delta X_i. \quad (9)$$

При реализации на ЭВМ за предельное решение принимается установившееся численное решение, которое при последовательном увеличении количества расчетных точек n на заданном интервале фазового превращения, а, следовательно, при уменьшении межточечного интервала времени Δt приводит к установлению стабильного значения объемной доли X_Σ структурной фазы.

Структурная диаграмма для термического цикла сварки в выбранной точке металла сварного соединения определяется пошаговым вычитанием объемных долей образующихся фаз на данный момент времени из объемной доли аустенита на данном шаге.

Результаты (Results)

Экспериментальные и численные исследования выполнены для лазерной сварки стали 10ХСНД. В процессе экспериментов была выполнена сварка двух листов толщиной 20 мм в стык без разделки кромок. С каждой стороны листа был сделан один сварочный проход. Полученное сварное соединение, представляющее собой две встречных зоны проплавления с перекрытием в районе корней (рис. 1), использовалось в экспериментальных исследованиях микроструктуры шва и ЗТВ, а также для коррекции численной модели. Скорость сварки $W = 15$ мм/с при мощности излучения лазера, равной 8 кВт, положение фокуса $s = -3$ мм относительно поверхности листа металла.

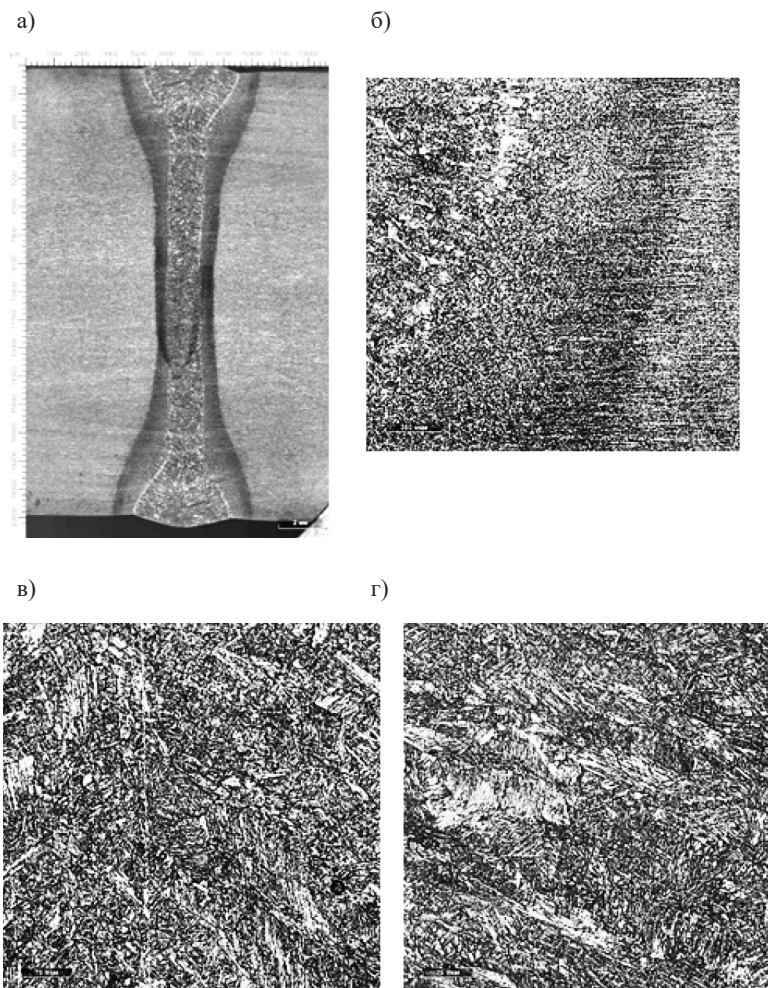


Рис. 1. Лазерный шов образца стали марки 10XCHD:
а — общий вид шва; б — верхняя часть шва и зоны термического влияния;
в, г — бейнитно-мартенситная структура шва в верхней части $z/H = 0,1$

Для анализа структурно-фазовых изменений металла при лазерной сварке были рассмотрены зона шва и две зоны в ЗТВ, а именно перегрева и нормализации. Это объясняется тем, что именно они определяют прочность сварного соединения и здесь наиболее часто возникают разного рода дефекты при сварке. В каждой из этих зон по глубине шва выбирались точки с одинаковой максимальной температурой сварочного цикла. Так, для зоны шва $T_{\max} = 1900^\circ\text{C}$, для зоны перегрева $T_{\max} = 1350^\circ\text{C}$ и для зоны нормализации $T_{\max} = 1000^\circ\text{C}$. При этом необходимо отметить, что для зоны шва расчетное положение точки с максимальной температурой 1900°C может не соответствовать ее действительному расстоянию от оси шва, так как в тепловом расчете не учитывается конвективный перенос жидкого металла. Данная точка может находиться несколько ближе или дальше от оси шва, но при этом общая тенденция структурно-фазовых изменений сохранится. Выполненные расчеты температурного поля пластин металла, согласно ранее описанной модели, позволили построить температурные циклы сварки для всех необходимых для данного исследования точек шва и ЗТВ, получить значения скоростей нагрева и охлаждения в них, а также определить временные интервалы пребывания в зонах межкритических температур.

Анализ полученных результатов расчета показал, что максимальные скорости нагрева и охлаждения в выбранных точках при переходах из каждой зоны в соседнюю по направлению к шву на одной и той же глубине сварного соединения приводит к их возрастанию в 1,7–2,5 раза. Так, например, если в зоне нормализации в точке $z/H = 0,1$ (H — глубина сварного шва) с максимальной температурой цикла $T_{\max} = 1000^\circ\text{C}$ максимальные скорости нагрева и охлаждения имеют значение 4200 и -320°C/s соответственно, то переход в зону перегрева с $T_{\max} = 1350^\circ\text{C}$ увеличива-

ет максимальные скорости до ~ 7000 и -720 °C/с, а переход в зону шва с $T_{\max} = 1900$ °C повышает их до ~ 17000 и -1700 °C/с. С увеличением глубины максимальная скорость нагрева возрастает, а максимальная скорость охлаждения до относительной глубины $z/H = 0,2 \sim 0,25$ от поверхности листа, т. е. в широкой части шва, остается приблизительно постоянной, и только после входа в более узкую часть шва начинает расти. В зоне нормализации на глубине $z/H = 0,8$ максимальные скорости нагрева и охлаждения достигают $\partial T/\partial t_{\max} = 11000$ °C/с и $\partial T/\partial t_{\max} = -1320$ °C/с соответственно.

Объемные доли бейнита (В) и мартенсита (М)

по глубине сварного соединения стали 10ХСНД, выполненного лазерной сваркой

z/H	Зона шва $T_{\max} = 1900$ °C		ЗТВ (зона перегрева) $T_{\max} = 1350$ °C		ЗТВ (зона нормализации) $T_{\max} = 1000$ °C	
	В	М	В	М	В	М
0,1	0,1986	0,8014	0,2013	0,7987	0,1975	0,8025
0,2	0,1944	0,8056	0,1963	0,8037	0,1901	0,8099
0,3	0,1887	0,8113	0,1882	0,8118	0,1797	0,8203
0,4	0,1719	0,8281	0,1674	0,8326	0,1535	0,8465
0,5	0,1320	0,8680	0,1222	0,8778	0,1029	0,8971
0,6	0,0702	0,9298	0,0607	0,9393	0,0465	0,9535
0,7	0,0237	0,9763	0,0193	0,9807	0,0121	0,9879
0,8	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0

Было выполнено построение диаграммы распада аустенита стали 10ХСНД (рис. 2, а) и по ней рассчитаны структурные диаграммы для термических циклов в зоне шва и зонах перегрева и нормализации ЗТВ (полученные результаты приведены в таблице). Расчет показал, что в верхней более широкой части сварного соединения до глубины шва $z/H = 0,2 \sim 0,25$ соотношение количества, образующегося бейнита и мартенсита, во всех трех зонах в поперечном направлении сохраняется постоянным: бейнита около 20 % и мартенсита около 80 %, что соответствует экспериментальным результатам (рис. 2, в–д).

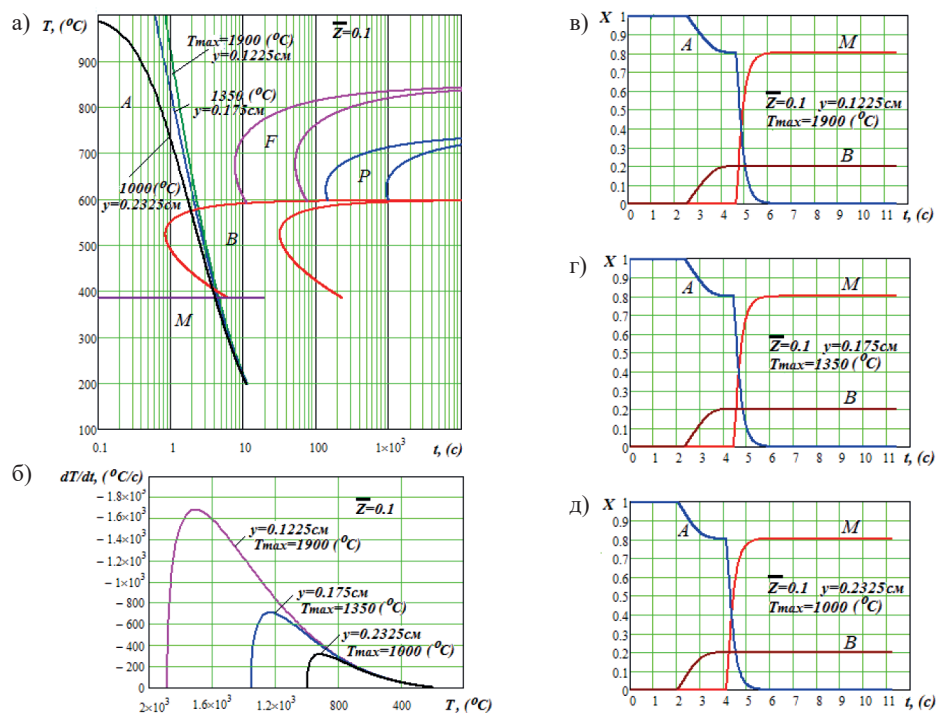


Рис. 2. Примеры расчетов структурных диаграмм для термических циклов в верхней части лазерного шва и ЗТВ: а — изотермическая диаграмма распада аустенита стали 10ХСНД с термическими циклами (А — аустенит; F, P, B, М — зоны распада аустенита на феррит, перлит, бейнит, мартенсит); б — скорость охлаждения в шве и ЗТВ, в–д — структурные диаграммы термических циклов (А, В, М — аустенит, бейнит, мартенсит; у — дистанция от оси шва)

Такое поведение объясняется тем, что ниже $T = \sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ скорость охлаждения практически совпадает для всех трех термических циклов (рис. 2, б), отличие в скоростях охлаждения находится в высокотемпературной области выше $700\ldots 800\text{ }^{\circ}\text{C}$. В зоне бейнитного превращения скорость охлаждения металла изменяется с $\partial T/\partial t = -180\ldots -200\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ на входе в нее до $\partial T/\partial t = -50\ldots -75\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ на переходе в зону мартенситного превращения. Экспериментальные исследования показали, что участки перегрева и нормализации ЗТВ имеют бейнитно-мартенситную структуру протяженностью $400\ldots 450\text{ мкм}$, в которой в зоне крупного зерна шириной $\sim 60\ldots 75\text{ мкм}$ размер зерна составляет $\sim 30\ldots 50\text{ мкм}$, а в зоне мелкого зерна, шириной $\sim 370\ldots 400\text{ мкм}$, размер зерна $\sim 10\ldots 25\text{ мкм}$ (см. рис. 1, в, г, рис. 3).

а)



б)

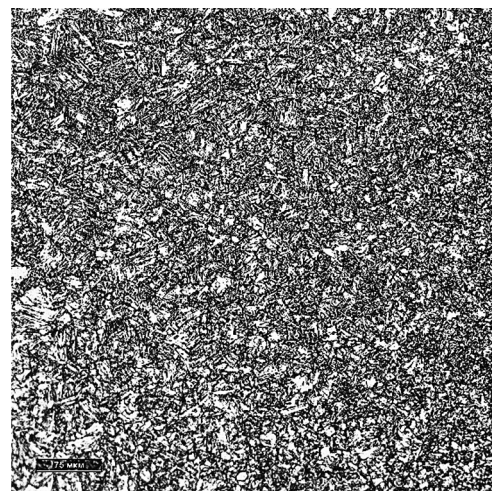


Рис. 3. Бейнитно-мартенситная структура в зонах перегрева и нормализации в верхней части $z/H = 0,1$ сварного соединения:
а — зона крупного зерна; б — зона мелкого зерна

При рассмотрении структурно-фазового изменения металла шва и ЗТВ по глубине (рис. 4, а, в–г, рис. 5, а, в–г) расчеты показали, что во всех трех исследуемых зонах происходит уменьшение бейнитной составляющей и увеличение мартенситной с ростом глубины. Это связано с увеличением скоростей охлаждения по глубине сварного соединения. Кроме того, выравнивание скорости охлаждения в области бейнитно-мартенситного превращения наступает при $T = 300\ldots 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 4, б, 5, б). Поэтому в этой зоне скорости охлаждения металла для точек на разной глубине существенно различаются, что ведет к более существенному изменению соотношения долей бейнита и мартенсита, чем в поперечном направлении шва. Так, например, в зоне перегрева ЗТВ на глубине $z/H = 0,1$, на входе в зону бейнитного превращения, скорость охлаждения металла составляет $\partial T/\partial t = -200\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, на глубине $z/H = 0,6$ увеличивается до $\partial T/\partial t = -300\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, а на глубине $z/H = 0,8$ составляет $\partial T/\partial t = -600\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$. Аналогичная картина наблюдается в зоне нормализации, где скорость охлаждения на этих же глубинах составляет $\partial T/\partial t = -170, -250, -550\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ соответственно. При этом скорость изменения соотношения долей бейнита и мартенсита увеличивается в пользу мартенсита с ростом глубины положения рассматриваемой точки. На глубине шва более $z/H = 0,8$ объемная доля мартенсита становится равной единице для всех трех зон. В зоне мартенситного превращения скорости охлаждения на входе в зону изменяются от $\partial T/\partial t = -70\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ при $z/H = 0,1$ до $\partial T/\partial t = -170\ldots -200\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ на глубине $z/H = 0,8$ и далее уменьшаются во времени.

На участки ЗТВ перегрева и нормализации в средней части сварного соединения на глубине $z/H = 0,6$ (рис. 6, а, б) имеют бейнитно-мартенситную структуру протяженностью $300\ldots 320\text{ мкм}$. В зоне крупного зерна шириной $60\ldots 75\text{ мкм}$ размер зерна составляет $50\ldots 70\text{ мкм}$. Зона мелкого зерна имеет ширину $240\ldots 250\text{ мкм}$ с размером зерна в диапазоне $10\ldots 25\text{ мкм}$.

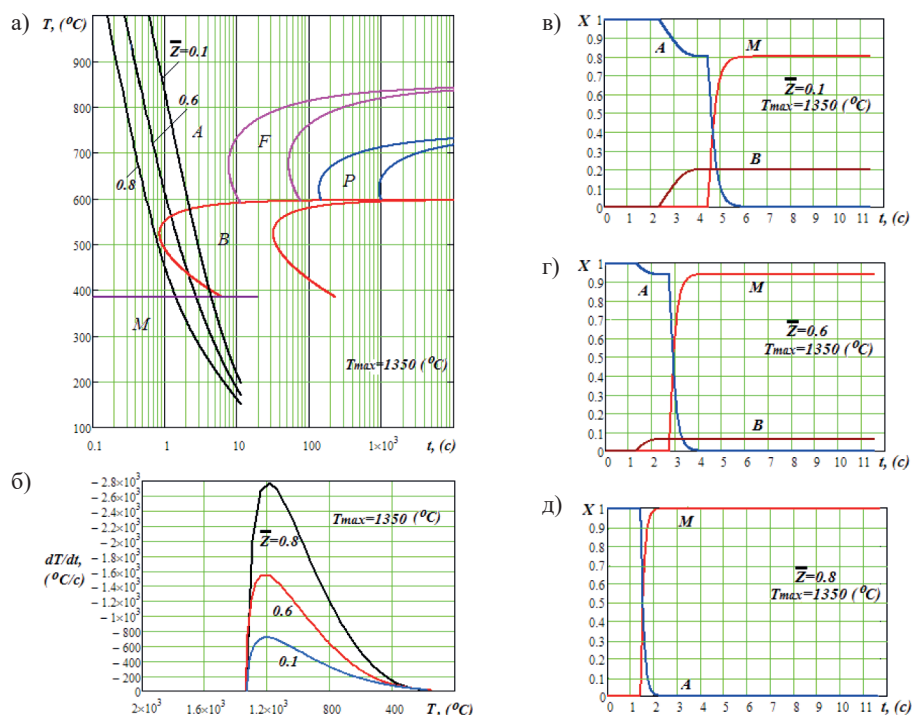


Рис. 4. Примеры расчетов структурных диаграмм

для термических циклов в ЗТВ (зона перегрева) по глубине шва:

а — изотермическая диаграмма распада аустенита стали 10XCHD с термическими циклами;

б — скорости охлаждения в ЗТВ по глубине z/H ;

в–д — структурные диаграммы для термических циклов в ЗТВ по глубине z/H

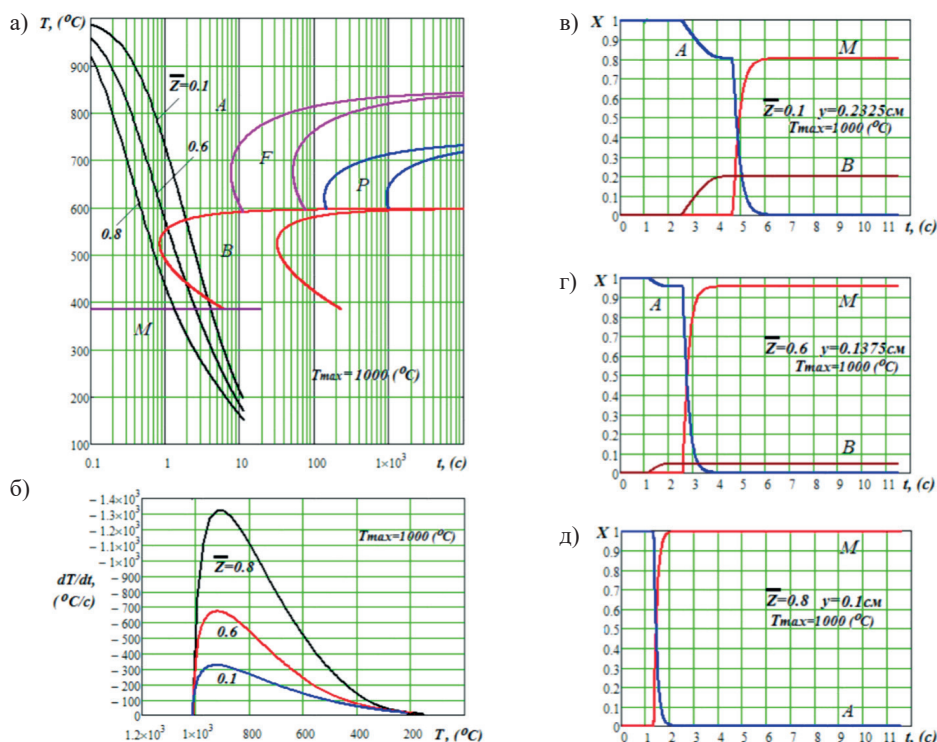


Рис. 5. Примеры расчетов структурных диаграмм

для термических циклов в ЗТВ (зона нормализации) по глубине шва:

а — изотермическая диаграмма распада аустенита стали 10XCHD с термическими циклами;

б — скорости охлаждения в ЗТВ по глубине z/H ;

в–д — структурные диаграммы для термических циклов в ЗТВ по глубине z/H

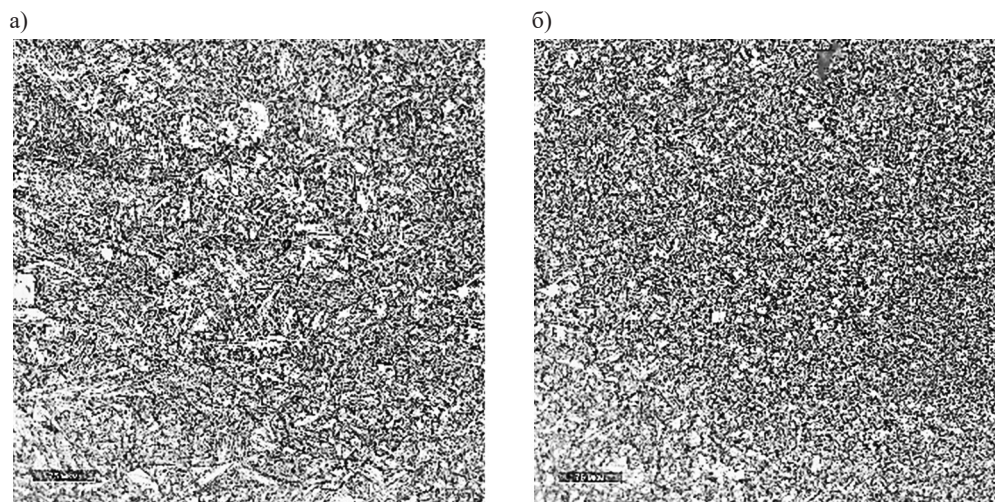


Рис. 6. Бейнитно-мартенситная структура
в зонах перегрева и нормализации в средней части сварного соединения:
а — зона крупного зерна; *б* — зона мелкого зерна.

Результаты исследования показали, что предлагаемый подход к проблеме количественной оценки объемной доли структурно-фазовых составляющих металла шва и ЗТВ позволяет прогнозировать соотношение фаз в различных точках лазерного сварного соединения. Полученные результаты показали, что в направлении, перпендикулярном оси шва, структурно-фазовый состав в количественном соотношении объемной доли бейнита и мартенсита в зоне шва и ЗТВ (зоны перегрева и нормализации) практически не изменяется. В то же время в направлении по глубине шва происходит существенное увеличение объемной доли мартенсита. В корневой части шва и ЗТВ металл имеет целиком мартенситную микроструктуру.

Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. На основе численного моделирования тепловых процессов и структурно-фазовых превращений металла шва и ЗТВ, сопровождающих лазерную сварку, предлагается метод количественной оценки объемной доли структурно-фазовых составляющих металла шва и ЗТВ. Суть метода заключается в использовании расчетных кривых термических циклов в интересующих зонах шва и ЗТВ по предложенной тепловой модели лазерной сварки для расчета объемных долей структурных фаз на временном отрезке термического цикла, основанной на построении изотермических ТТТ диаграмм распада аустенита по модели Kirkaldy–Li. Предлагаемый алгоритм расчета позволяет избежать решения уравнения для количества объемной доли структурно-фазовых составляющих металла на каждом шаге вычислений.

2. Результаты расчета показали, что максимальные скорости нагрева и охлаждения в выбранных точках при переходах из каждой зоны в соседнюю по направлению к центру шва на одной и той же глубине сварного соединения приводят к их возрастанию в 1,7–2,5 раза. В зоне нормализации в точке $z/H = 0,1$ с максимальной температурой цикла $T_{\max} = 1000$ °C максимальные скорости нагрева и охлаждения имеют значения 4200 °C/c и –320 °C/c соответственно. Переход в зону перегрева с $T_{\max} = 1350$ °C увеличивает максимальные скорости до ~7000 °C/c и –720 °C/c, а переход в зону шва с $T_{\max} = 1900$ °C повышает их до ~17000 °C/c и –1700 °C/c. С увеличением глубины максимальная скорость нагрева возрастает, а максимальная скорость охлаждения до относительной глубины $z/H = 0,2 \sim 0,25$ от поверхности листа, т. е. в широкой части шва, остается приблизительно постоянной, и только после входа в более узкую часть шва начинает расти. Так, в зоне нормализации на глубине $z/H = 0,8$ максимальные скорости нагрева и охлаждения достигают $\partial T / \partial t_{\max} = 13500$ °C/c и $\partial T / \partial t_{\max} = -1400$ °C/c соответственно.

3. Расчет показал, что в верхней более широкой части сварного соединения до глубины шва $z/H = 0,2...0,25$ соотношение количества, образующегося бейнита и мартенсита, во всех трех зонах в поперечном направлении сохраняется постоянным: бейнита около 20 % и мартенсита около 80 %. Такое поведение объясняется тем, что ниже температуры, равной $\sim 700^\circ\text{C}$, скорость охлаждения практически совпадает для всех трех термических циклов (см. рис. 2, б), а отличие в скоростях охлаждения находится в высокотемпературной области выше $700...800^\circ\text{C}$.

4. Выравнивание скоростей охлаждения по глубине сварного соединения в области бейнитно-мартенситного превращения наступает при $T = 300...350^\circ\text{C}$. Поэтому в зонах перегрева и нормализации скорости охлаждения металла для точек на разной глубине существенно отличаются, что ведет к более существенному изменению соотношения долей бейнита и мартенсита, чем в поперечном направлении шва. Так, например, в зоне перегрева ЗТВ на глубине $z/H = 0,1$ на входе в зону бейнитного превращения скорость охлаждения металла составляет с $\partial T/\partial t = -200^\circ\text{C}/\text{с}$, на глубине $z/H = 0,6$ она увеличивается до $\partial T/\partial t = -300^\circ\text{C}/\text{с}$, а на глубине $z/H = 0,8$ составляет $\partial T/\partial t = -600^\circ\text{C}/\text{с}$. Аналогичная картина наблюдается в зоне нормализации, где скорость охлаждения на этих же глубинах составляет $\partial T/\partial t = -170, -250, -550^\circ\text{C}/\text{с}$ соответственно. Соотношения долей бейнита и мартенсита увеличивается в пользу мартенсита с ростом глубины положения рассматриваемой точки. На глубине шва больше $z/H = 0,8$ объемная доля мартенсита становится равной единице для всех трех зон.

5. Экспериментальные исследования подтвердили, что участки перегрева и нормализации ЗТВ имеют бейнитно-мартенситную структуру. В верхней части шва в зоне перегрева и нормализации протяженностью 400...450 мкм в зоне крупного зерна шириной $\sim 60...75$ мкм размер зерна составляет $\sim 30...50$ мкм, а в зоне мелкого зерна шириной $\sim 370...400$ мкм размер зерна $\sim 10...25$ мкм. Участки ЗТВ перегрева и нормализации в средней части сварного соединения на глубине $z/H = 0,6$ имеют также бейнитно-мартенситную структуру протяженностью 300...320 мкм. В зоне крупного зерна шириной 60...75 мкм размер зерна составляет 50...70 мкм. Зона мелкого зерна имеет ширину 240...250 мкм с размером зерна в диапазоне 10...25 мкм. Сварное соединение на глубине больше $z/H = 0,8$ имеет мартенситную структуру в зоне шва и участках перегрева и нормализации ЗТВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shipbuilding companies see the future in lasers [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.inngulaser.net/a/NEWS_CENTER/Industry_News/131.html (дата обращения: 05.06.2023).
2. Oliveira A. Implementation of new production processes in panel's line / A. Oliveira, J. M. Gordo // Maritime Transportation and Harvesting of Sea Resources. — 2018. — Pp. 763–773.
3. Steshenkova N. A. Laser technologies in modern shipbuilding / N. A. Steshenkova, N. A. Nosyrev // Laser in Manufacturing Conference. — Munich, 2017.
4. Wei H. L. Fusion zone microstructure and geometry in complete-joint-penetration laser-arc hybrid welding of low-alloy steel / H. L. Wei, J. J. Blecher, T. A. Palmer, T. Debroy // Welding Journal. — 2015. — Vol. 94. — Is. 4. — Pp. 135–144.
5. Chen L. Numerical and experimental investigation on microstructure and residual stress of multi-pass hybrid laser-arc welded 316L steel / L. Chen, G. Mi, X. Zhang, C. Wang // Materials & Design. — 2019. — Vol. 168. — Pp. 107653. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107653.
6. Касаткин О. Г. Расчетные модели для определения критических точек стали / О. Г. Касаткин, Б. Б. Винокур // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1984. — № 1. — С. 20–22.
7. Lehto P. EBSD datasets for low-alloy steel weld metals — Arc, Laser, and Laser-hybrid welding / P. Lehto // Zenodo. — 2021. DOI: 10.5281/zenodo.5054204.
8. Григоренко Г. М. Прогнозирование температур фазовых превращений аустенита в высокопрочных низколегированных сталях / Г. М. Григоренко, В. А. Костин // Современная электрометаллургия. — 2013. — № 1. — С. 33–39.
9. Олышанская Т. В. Выбор основных критериев термического цикла для методов прогнозирования структуры сварных швов при электронно-лучевой сварке / Т. В. Олышанская, Е. М. Федосеева // Вестник

Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. — 2019. — Т. 21. — № 2. — С. 73–81. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.2.09.

10. Макаrchук *Н. В.* Моделирование формирования первичной макроструктуры сварного шва при лазерной сварке / Н. В. Макаrchук, А. В. Макаrchук, В. Н. Старцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 2. — С. 281–295. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-281-295.

11. Kirkaldy *J. S.* Prediction of microstructure and hardenability in low alloy steels / J. S. Kirkaldy // Proceedings of the International Conference on Phase Transformation in Ferrous Alloys, 1983. — AIME: New York, 1984. — Pp. 125–148.

12. Kirkaldy *J. S.* Diffusion-controlled phase transformations in steels. Theory and applications / J. S. Kirkaldy // Scandinavian Journal of Metallurgy. — 1991. — Vol. 20. — Pp. 50.

13. Li *M. V.* A computational model for the prediction of steel hardenability / M. V. Li, D. V. Niebuhr, L. L. Meekisho, D. G. Atteridge // Metallurgical and Materials transactions B. — 1998. — Vol. 29. — Pp. 661–672. DOI: 10.1007/s11663-998-0101-3.

14. Liu *S.* Correlation of high power laser welding parameters with real weld geometry and microstructure / S. Liu, G. Mi, F. Yan, C. Wang, P. Jiang // Optics & Laser Technology. — 2017. — Vol. 94. — Pp. 59–67. DOI: 10.1016/j.optlastec.2017.03.004.

15. Gorni *A. A.* Steel forming and heat treating handbook / A. A. Gorni. — 2015. DOI: 10.13140/RG.2.1.1695.9764.

16. Celada-Casero *C.* The role of the austenite grain size in the martensitic transformation in low carbon steels / C. Celada-Casero, J. Sietsma, M. J. Santofimia // Materials & Design. — 2019. — Vol. 167. — Pp. 107625. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107625.

REFERENCES

1. Shipbuilding companies see the future in lasers. Web. 5 Jun. 2023 <http://www.inngulaser.net/a/NEWS_CENTER/Industry_News/131.html>.

2. Oliveira, A., and J. M. Gordo. “Implementation of new production processes in panel’s line.” *Maritime Transportation and Harvesting of Sea Resources* (2018): 763–773.

3. Steshenkova, Natalia A., and Nikolay A. Nosyrev. “Laser technologies in modern shipbuilding.” *Lasers in Manufacturing Conference*. Munich, 2017.

4. Wei, H. L., J. J. Blecher, T. A. Palmer, and T. Debroy. “Fusion zone microstructure and geometry in complete-joint-penetration laser-arc hybrid welding of low-alloy steel.” *Welding Journal* 94.4 (2015): 135–144.

5. Chen, Lin, Gaoyang Mi, Xiong Zhang, and Chunming Wang. “Numerical and experimental investigation on microstructure and residual stress of multi-pass hybrid laser-arc welded 316L steel.” *Materials & Design* 168 (2019): 107653. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107653.

6. Kasatkin, O.G., and B. B. Vinokur. “Raschetnye modeli dlya opredeleniya kriticheskikh toчек stali.” *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* 1 (1984): 20–22.

7. Lehto, Pauli. “EBSD datasets for low-alloy steel weld metals — Arc, Laser, and Laser-hybrid welding.” *Zenodo* (2021). DOI: 10.5281/zenodo.5054204.

8. Grigorenko, G. M., and V. A. Kostin. “Prognozirovanie temperatur fazovykh prevrashchenii austenita v vysokoprochnykh nizkolegirovannykh stalyakh.” *Sovremennaya elektrometallurgiya* 1 (2013): 33–39.

9. Olshanskaya, T.V., and E. M. Fedoseeva. “Selection of the main criteria of the thermal cycle for the predicting methods of the structure of welds at electron-beam welding.” *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science* 21.2 (2019): 73–81. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.2.09.

10. Makarchuk, Natalia V., Alexandra V. Makarchuk, and Vasiliy N. Startsev “Modeling of the weld primary macrostructure formation at laser welding.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.2 (2022): 281–295. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-281-295.

11. Kirkaldy, J. S. “Prediction of microstructure and hardenability in low alloy steels.” *Proceedings of the International Conference on Phase Transformation in Ferrous Alloys*. AIME: New York, 1984. 125–148.

12. Kirkaldy, J. S. “Diffusion-controlled phase transformations in steels. Theory and applications.” *Scandinavian Journal of Metallurgy* 20 (1991): 50.

13. Li, M. Victor, David V. Niebuhr, Lemmy L. Meekisho, and David G. Atteridge. “A computational model for the prediction of steel hardenability.” *Metallurgical and Materials transactions B* 29 (1998): 661–672. DOI: 10.1007/s11663-998-0101-3.

14. Liu, Sang, Gaoyang Mi, Fei Yan, Chunming Wang, and Ping Jiang. "Correlation of high power laser welding parameters with real weld geometry and microstructure." *Optics & Laser Technology* 94 (2017): 59–67. DOI: 10.1016/j.optlastec.2017.03.004.

15. Gorni, Antonio. *Steel forming and heat treating handbook*. 2015. DOI: 10.13140/RG.2.1.1695.9764.

16. Celada-Casero, Carola, Jilt Sietsma, and Maria Jesus Santofimia. "The role of the austenite grain size in the martensitic transformation in low carbon steels." *Materials & Design* 167 (2019): 107625. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107625.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Макарчук Наталия Васильевна —

кандидат технических наук

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: mnv_guap@mail.ru, kaf_vsi@gumrf.ru

Макарчук Александра Васильевна —

кандидат технических наук

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: makarchukav@gumrf.ru

Старцев Василий Николаевич —

кандидат технических наук

НИЦ «Курчатовский институт» —

ЦНИИ КМ «Прометей»

191015, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Шпалерная, 49

e-mail: starlv@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Makarchuk, Natalia V. —

PhD

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,

Russian Federation

e-mail: mnv_guap@mail.ru, kaf_vsi@gumrf.ru

Makarchuk, Alexandra V. —

PhD

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,

Russian Federation

e-mail: makarchukav@gumrf.ru

Startsev, Vasilii N. —

PhD

NRC "Kurchatov Institute" —

CRISM "Prometey"

49 Shpalernaya Str., St. Petersburg, 191015,

Russian Federation

e-mail: starlv@mail.ru

Статья поступила в редакцию 23 июня 2023 г.

Received: June 23, 2023.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-646-657

DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL BASE FOR TRAINING SPECIALISTS IN THE FIELD OF MARINE ENERGY

O. K. Bezjukov, V. A. Zhukov, V. G. Nikiforov

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

The implementation of federal programs for the modernization of the transport system of the Russian Federation requires the solution of a set of tasks, the most important of which is the training of highly qualified specialists in the transport industry. A necessary condition for high-quality training of specialists is certainly a modern educational and laboratory base. The Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping has been training specialists in the field of marine energy for many decades. In order to continue training specialists in this area at a high level, it is necessary to modernize the material base, create laboratories that meet modern requirements. In order to achieve this goal, a project to create an educational and scientific center "Energy efficiency and reliability of marine machinery and mechanisms" is proposed. The concept of creating a center is presented in the paper, the laboratories that should be part of it are listed, the examples of laboratory layouts and their main equipment are provided. It is proposed to include a laboratory for testing engines in container design and a floating laboratory in the educational and scientific center. The creation of an educational and scientific center equipped with modern equipment will provide conditions for high-quality training of specialists for industry enterprises, as well as provide an opportunity to solve current scientific problems in the field of marine energy. The concept of creating an educational and scientific center is supported by the Board of Trustees of the University.

Keywords: ship power engineering, personnel training, material base, laboratory equipment, educational and scientific center.

For citation:

Bezjukov, Oleg K., Vladimir A. Zhukov, and Vladimir G. Nikiforov. "Development of scientific and technical base for training specialists in the field of marine energy." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 646–657. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-646-657.

УДК 629.5.06

РАЗВИТИЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

О. К. Безюков, В. А. Жуков, В. Г. Никифоров

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

В работе отмечается, что реализация федеральных программ по модернизации транспортной системы Российской Федерации требует решения комплекса задач, важнейшей из которых является подготовка высококвалифицированных специалистов транспортной отрасли. Подчеркивается, что необходимым условием качественной подготовки специалистов, безусловно, является современная учебно-лабораторная база. В ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» на протяжении многих десятилетий ведется подготовка специалистов в области судовой энергетики. Для продолжения подготовки специалистов указанного направления на высоком уровне необходима модернизация материальной базы, создание лабораторий, отвечающих современным требованиям. С целью достижения указанной цели предлагается проект

создания учебно-научного центра «Энергоэффективность и надежность судовых машин и механизмов». В статье представлена концепция создания центра, указаны лаборатории, которые должны войти в его состав, приведены примеры планировок лабораторий и их основное оборудование. Предложено включить в состав учебно-научного центра лабораторию испытаний двигателей в контейнерном исполнении и плавучую лабораторию. На основании приведенного обоснования сделан вывод о том, что создание учебно-научного центра, оснащенного современным оборудованием, обеспечит условия качественной подготовки специалистов для предприятий отрасли, а также позволит решать актуальные научные задачи в области судовой энергетики. Отмечается, что концепцию создания учебно-научного центра поддержал попечительский совет университета.

Ключевые слова: судовая энергетика, подготовка кадров, материальная база, лабораторное оборудование, учебно-научный центр.

Для цитирования:

Безюков О. К. Развитие научно-технической базы подготовки специалистов в области судовой энергетики / О. К. Безюков, В. А. Жуков, В. Г. Никифоров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 646–657. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-646-657.

Введение (Introduction)

В настоящее время большое внимание уделяется модернизации высшего образования. В своем выступлении на заседании Совета по науке и образованию 8 февраля 2023 г. Президент Российской Федерации В. В. Путин отметил необходимость четкой расстановки приоритетов и концентрации ресурсов на получении конкретных, принципиально значимых научных результатов, прежде всего в тех сферах деятельности, где имеются хорошие наработки, а также в тех направлениях деятельности, которые имеют критическое значение для жизни страны, включая транспорт и энергетику. Кроме того, необходимо пересмотреть подходы к мероприятиям в области научно-технологического развития как в части выполнения НИОКРов, так и в вопросах подготовки кадров и повышения качества высшего образования. В Послании Федеральному Собранию от 21 февраля 2023 г. Президент РФ В. В. Путин, в частности, отметил, что в российской высшей школе назрела необходимость существенных изменений с учетом новых требований, предъявляемых к специалистам в экономике, социальных отраслях и во всех сферах нашей жизни, а также лучших традиций советской системы образования и положительного опыта последних десятилетий [1].

В течение более девяноста лет в Ленинградском институте водного транспорта (ЛИВТ) — ныне ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, ведется подготовка специалистов для отечественного флота и судостроения. Преподаватели и сотрудники вуза участвуют в решении различных научно-технических задач в интересах развития водного транспорта, среди которых научно-методическая поддержка дизелизации судов внутреннего и смешанного *река — море* плавания в конце 50-х начале 60-х гг. XX в., создание судовых дизельных энергетических установок судов смешанного *река — море* плавания, внедрение на речном флоте новых видов топлива.

Современный этап развития отрасли характеризуется прежде всего активным развитием судоходства по Северному морскому пути. Освоение арктических акваторий требует подготовки специалистов, способных обеспечить строительство современного флота и эксплуатацию судов в особых условиях [3]–[6]. Актуальными остаются задачи повышения энергоэффективности морских и речных судов [7]–[10], расширения использования на флоте газовых топлив [11]–[13], решение проблемы импортозамещения в области судовой энергетики [14], [15]. Реализация этих задач невозможна без решения кадровой проблемы подготовки специалистов, востребованных отраслью и обладающих комплексом необходимых компетенций.

Реализация государственной программы «Развитие судостроения и техники для освоения шельфовых месторождений», утвержденной Постановлением Правительства Российской Федерации № 404 от 18.03.2021 г., предусматривает решение следующих основных задач:

– разработка и внедрение новых прорывных разработок, необходимых для создания морской, речной техники и техники для освоения шельфовых месторождений;

- развитие инжиниринга в судостроительной промышленности до уровня, сопоставимого со странами-лидерами судостроения;
- развитие кадрового потенциала судостроения.

Важное значение в решении данного вопроса имеет привлечение к преподаванию работников отрасли и современное научно-техническое обеспечение учебного процесса. В данном случае аспект модернизации материальной базы подготовки специалистов в области судовой энергетики является ключевым.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В настоящее время в ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова создана система подготовки по направлению «Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры», включающая обучение по программе бакалавриата 26.03.02 (профили: «Кораблестроение» и «Судовые машины и механизмы», обучение по программе магистратуры 26.04.02 «Создание и ремонт судов и энергетического оборудования объектов морской и речной техники»), подготовку научно-педагогических кадров в аспирантуре по направлению 26.06.01 «Техника и технологии кораблестроения и водного транспорта» (профили: «Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства» и «Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)»).

С целью обеспечения высокого уровня подготовки специалистов по направлению «Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры», а также решения комплекса образовательных и научных задач в ГУМРФ разработана концепция учебно-научного центра «Энергоэффективность и надежность судовых машин и механизмов».

В составе учебно-научного центра планируется организовать следующие специализированные лаборатории.

- лаборатория теплофизических основ судовой энергетики;
- лаборатория технологического оборудования и подготовки образцов судостроительных материалов;
- лаборатория триботехнических свойств материалов;
- лаборатория главных и вспомогательных элементов СЭУ;
- лаборатория испытаний судовых ДВС;
- лаборатория химмотологии и эксплуатационных материалов.
- автоматизированная лаборатория рабочих процессов судовых энергетических установок.

Для этих лабораторий подобрано учебное и научное оборудование, разработана планировка помещений. На рис. 1–4 показана планировка отдельных лабораторий и размещение основного оборудования.

Лаборатория теплофизических основ судовой энергетики предназначена для изучения основных газовых законов и законов теплообмена, лежащих в основе работы тепловых двигателей. В ней предусмотрено размещение десяти лабораторных стендов, аналогичных представленным на рис. 1, б. Каждый из стендов соответствует определенному разделу дисциплины «Теплотехника».

Лаборатория триботехнических свойств материалов необходима для проведения учебных занятий по дисциплинам, предусмотренным учебными планами подготовки бакалавров и магистров по направлению «Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры», а также научных исследований, направленных на повышение надежности судовых машин и механизмов.

Оснащение лаборатории предоставляет возможность изучить конструкцию, принципы действия, технологию изготовления и правила эксплуатации главных и вспомогательных элементов энергетических установок современных судов различного назначения.

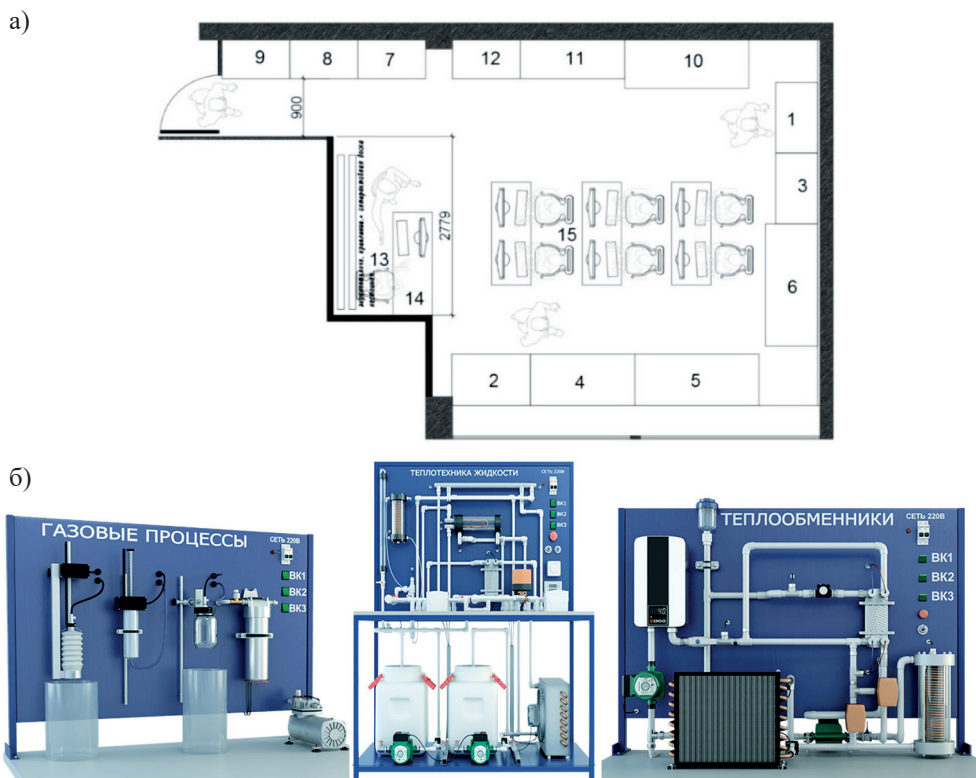


Рис. 1. Лаборатория теплофизических основ судовой энергетики:
а — общая планировка лаборатории; б — лабораторные стенды

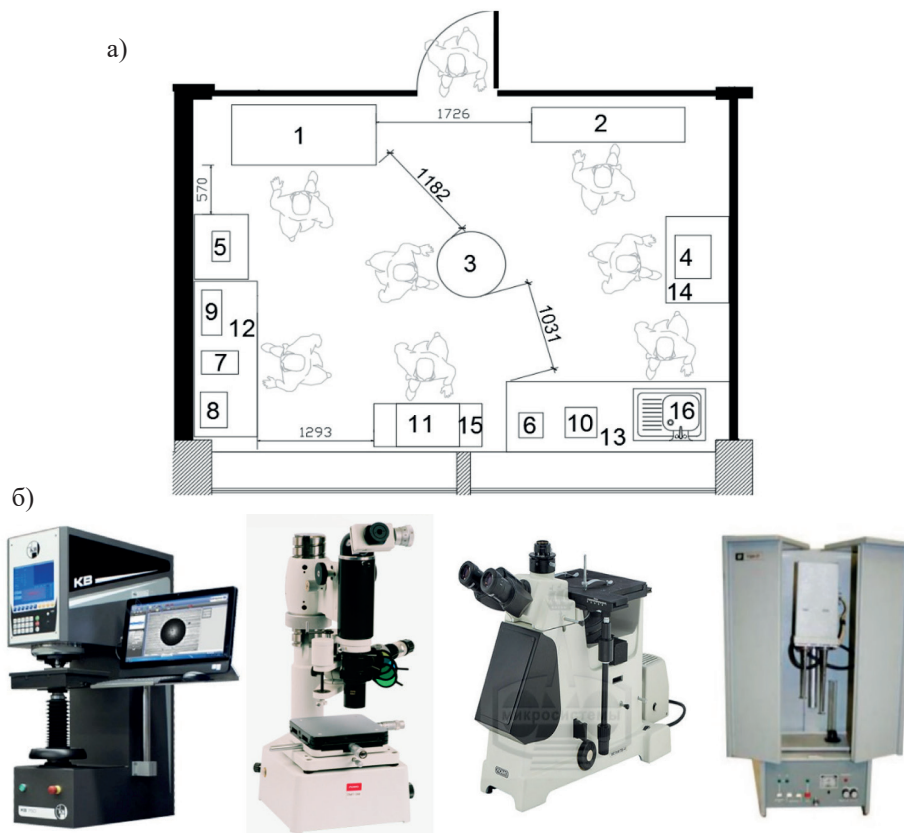


Рис. 2. Лаборатория триботехнических свойств материалов: а — планировка лаборатории;
б — лабораторное оборудование (универсальный цифровой твердомер KB 250 BVR, микротвердомер PMT-3M, микроскоп металлографический, микроскоп металлографический, ультразвуковой магнитострикционный вибратор)

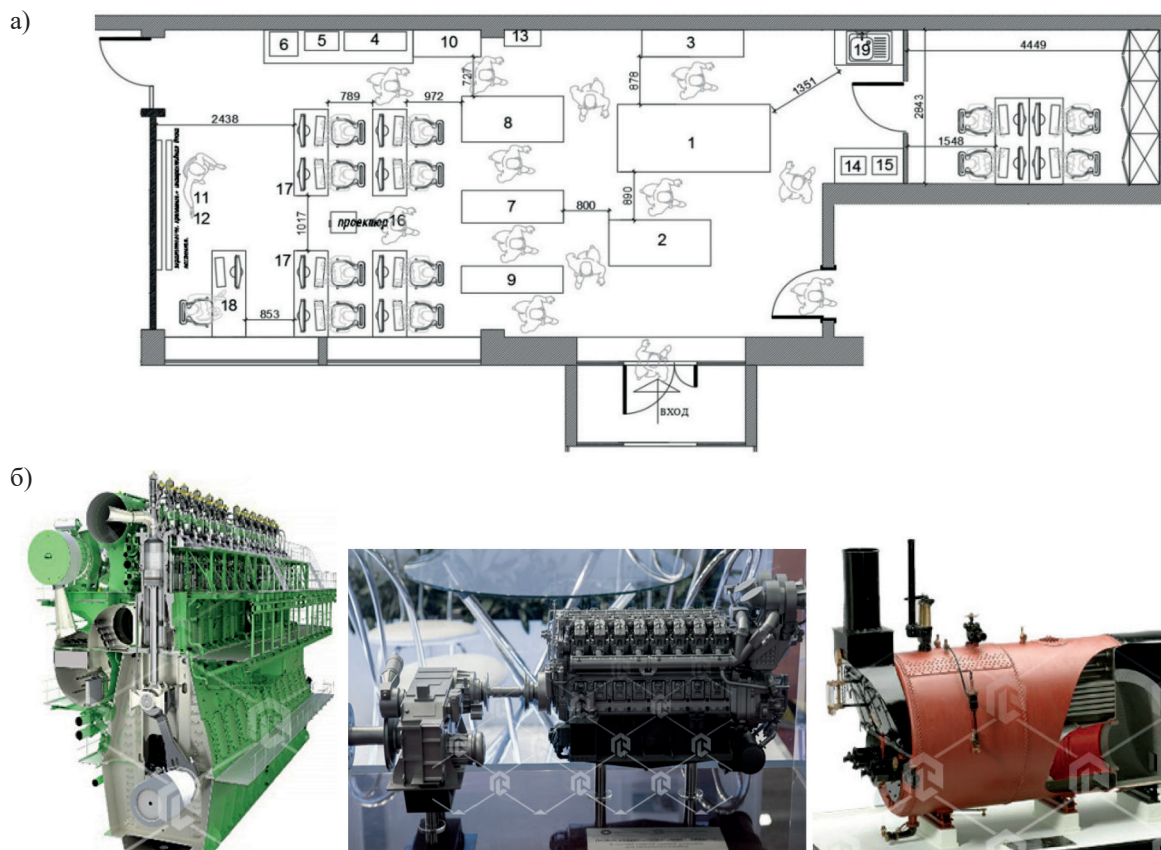


Рис. 3. Лаборатория главных и вспомогательных элементов СЭУ:
а — планировка лаборатории; б — главные и вспомогательные элементы СЭУ (малооборотный судовой дизель, высокооборотный дизель с редукторной передачей, автономный судовой котел)

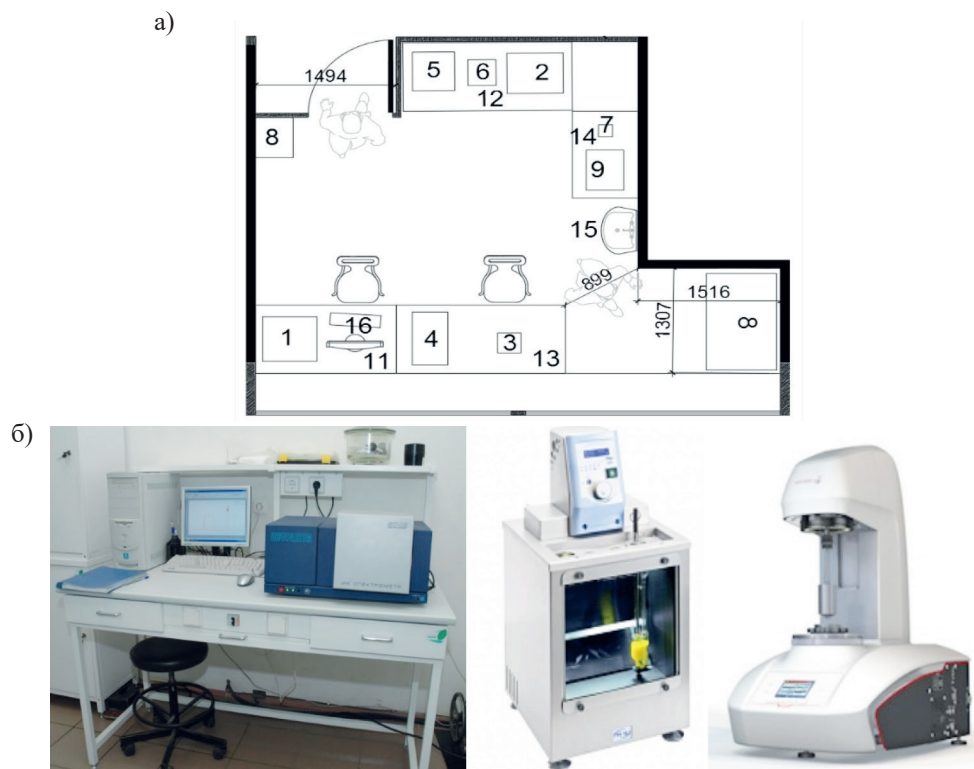


Рис. 4. Лаборатория химмотологии и эксплуатационных материалов:
а — планировка лаборатории; б — лабораторное оборудование (инфракрасный спектрометр, вискозиметрическая баня, реометр)

Лаборатория химмотологии и эксплуатационных материалов необходима для освоения современных методов определения свойств топлив и масел, контроля их качества, а также проведения исследований, направленных на совершенствование свойств эксплуатационных материалов с целью обеспечения надежности и экономичности элементов СЭУ.

Размещение испытательных станций дизелей в зданиях, предназначенных для научных исследований и образовательной деятельности, сопряжено со значительными трудностями и имеет серьезные ограничения по пожарной безопасности, охране труда, нормативам шума и вибрации. В связи с этим целесообразно размещать действующие испытываемые двигатели в отдельно стоящих контейнерах (контейнерное исполнение). Для исследований работы главных двигателей на газомоторном топливе целесообразно использовать современные отечественные дизели ОАО «Волжский дизель им. Маминых» типа 4ЧН21/21 (мощность 300 кВт) и соответствующие устройства, имитирующие нагрузку.

Для исследований вспомогательных двигателей на газомоторном топливе целесообразно использовать современные отечественные дизели типа ЯМЗ-8408ЧН14/14 (ЯМЗ-238) производства ОАО «Тутаевский моторный завод», а также газовую модификацию двигателя ЯМЗ-530CNG (рис. 5).

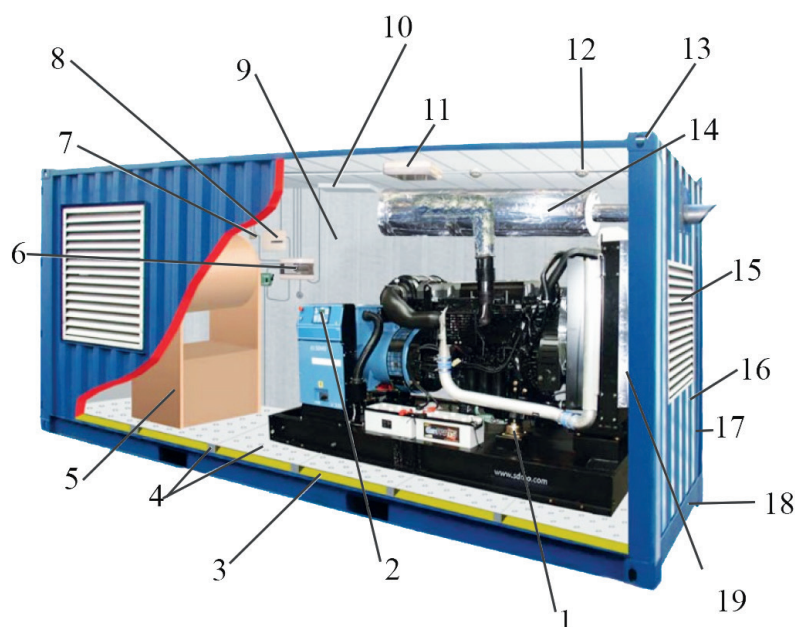


Рис. 5. Дизельный агрегат ЯМЗ в контейнерном исполнении: 1 — система виброгашения; 2 — пульт управления ДГУ с возможностью подключения системы дистанционного управления; 3 — термоизоляция пола специальными материалами (50–100 мм); 4 — усиленный пол, покрытый листом из рифленой стали; 5 — дополнительный топливный бак с системой автоматической заправки (опция); 6 — блок собственных нужд КДЭС; 7 — датчик системы обогрева (термостат); 8 — блок пожарно-охранной сигнализации; 9 — система термоизоляции на базе высококачественных сэндвич-панелей; 10 — система пожаротушения; 11 — система основного и аварийного освещения; 12 — датчик системы пожарной сигнализации; 13 — стандартные монтажные транспортировочные узлы; 14 — высокоэффективный тушитель системы выпуска; 15 — автоматические жалюзи системы вентиляции; 16 — высококачественное морозоустойчивое лакокрасочное покрытие; 17 — комбинированная система обогрева; 18 — жесткая каркасная конструкция; 19 — система шумопоглощения на вентиляционных отверстиях

Проект размещения испытательной станции контейнерного исполнения на базе двигателей ТМЗ, разработанный совместно с производителем двигателей, представлен на рис. 6 и 7.

Дополнительные возможности учебно-научного центра способно обеспечить несамоходное судно, которое может быть расположено у причала на реке Екатеринбургке в непосредственной

близости от здания Центра. Научно-технический потенциал университета и научно-педагогические кадры позволяют считать целесообразным создание на базе нашего вуза плавучей лаборатории «Судовая зеленая энергетика», целью которого является увеличение объема и качества исследований и подготовки кадров в области судовой энергетики, направленных на расширение сферы применения газомоторного топлива (природного и нефтяного газов, водорода), обеспечение научно-технической поддержки деятельности федеральных органов управления, судоходных компаний и портов, энергомашиностроительных предприятий в осуществлении этой деятельности, а также участие в совершенствовании нормативной базы Росморречфлота, Морского и Речного регистров судоходства.

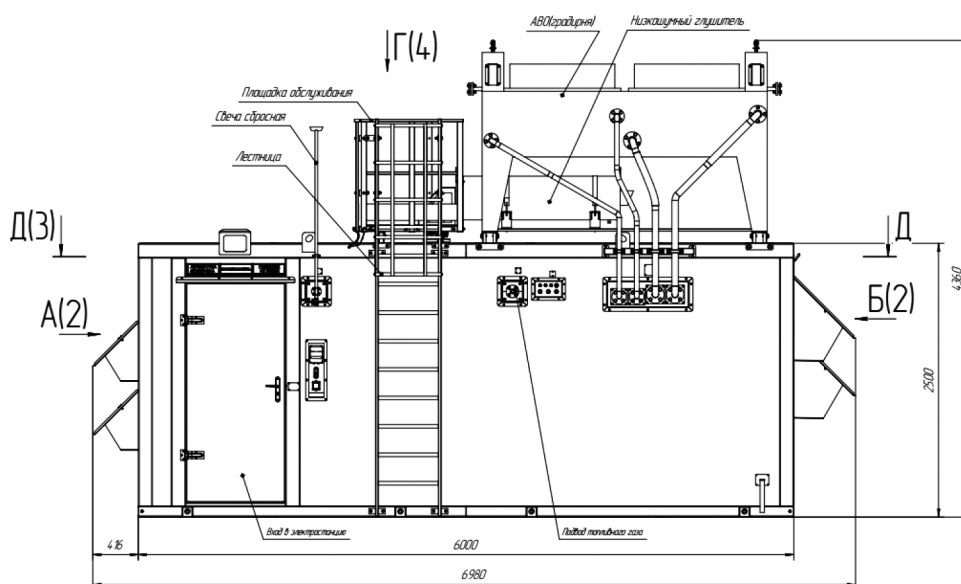


Рис. 6. Вид испытательной станции в контейнерном исполнении

а)

б)

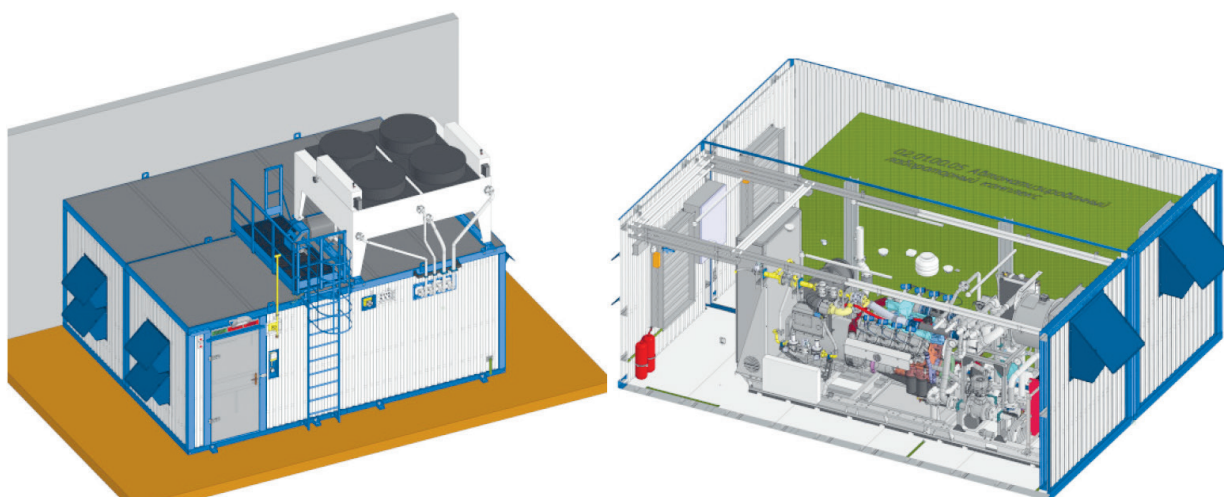
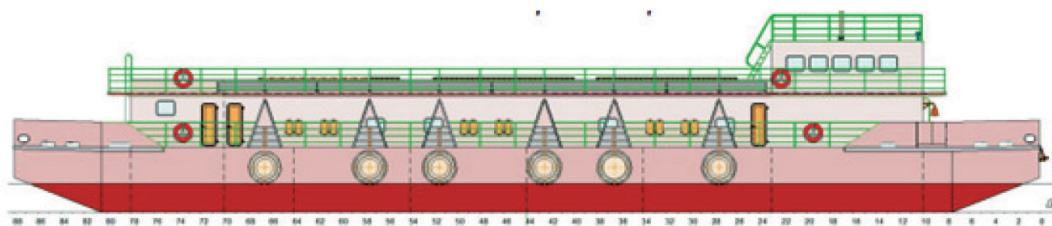


Рис. 7. Аксонометрическая проекция испытательной станции:
а — внешний вид; б — размещение оборудования

Плавучая лаборатория «Судовая зеленая энергетика» (рис. 8) представляет собой несамостоятельное судно шестигранной формы с двойными бортами, одноярусной надстройкой и избыточным надводным бортом.

а)



б)



Рис. 8. Плавающая лаборатория «Судовая зеленая энергетика»:
а — вид правого борта; б — вид сверху (1 — лаборатория рабочих процессов газовых и газодизельных двигателей; 2 — лаборатория экологических проблем судовой энергетики; 3 — лаборатория газового и криогенного оборудования; 4 — лаборатория пожаро- взрывобезопасности судового оборудования; 5 — лекционная аудитория)

Форма корпуса упрощенная: плоское днище, вертикальный борт и симметричные подзоры в оконечностях, с четырьмя водонепроницаемыми поперечными переборками, двумя водонепроницаемыми продольными переборками в средней части судна (вторые борта). В бортовом отсеке левого борта восемь поперечных полупереборок, в бортовом отсеке правого борта четыре поперечных полупереборок. Район и условия эксплуатации ПНС — бассейны разряда «Р» — Российского Речного регистра судоходства. Класс судна «+P1,2» PPP. Для обеспечения эксплуатационных режимов предусмотрен центральный пост управления, оперативный технический дежурный персонал из двух человек.

Предусмотрены следующие помещения: каюта для отдыха, помещение для приема пищи, раздевалка. Постоянного проживания на судне не предусматривается. В надстройке предусмотрены научно-учебные лаборатории рабочих процессов газовых и газодизельных двигателей, экологических проблем судовой энергетики; судового газового и криогенного оборудования; пожаровзрывобезопасности судового оборудования, а также лекционный класс.

В трюме расположены класс макетов дизельных двигателей и судового оборудования, однотипные газовый и двухтопливный главные двигатели, вспомогательный двухтопливный дизель-генератор, отделение для хранения дизельного, сжатого и сжиженного криогенного газового топлива, вспомогательное криогенное оборудование и др. Для обеспечения ремонта и монтажа механизмов предусмотрены грузоподъемные устройства. За основу (прототип) может быть принят проект RDB 66.51 плавучей насосной станции Ростовского ЦПКБ.

Создание плавучей лаборатории «Судовая зеленая энергетика» исключает негативное влияние работающего оборудования на безопасность учебного процесса в зданиях университета, не зависит от планов строительства или реконструкции зданий учебных корпусов, расположенных по адресу: Межевой канал, 2. Плавающая лаборатория может быть установлена у набережной реки Екатерингофки. Кафедра судостроения и энергетических установок готова выполнить НИОКР «Разработка концепции, эскизного и технического проектов плавучей лаборатории «Судовая зеленая энергетика».

Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

Создание учебно-научного центра обеспечит необходимую материальную базу для проведения лабораторных и практических работ по важнейшим дисциплинам профессиональной подготовки: «Трение и износ в машинах», «Теплотехника», «Судовые парогенераторы», «Судовые системы и вспомогательное оборудование», «Судовые дизели», «Химмотология» и др.

Лаборатории будут также использоваться в учебном процессе подготовки по смежным направлениям, например, 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов».

Создание учебно-научного центра позволит также успешно решать задачи, поставленные перед предприятиями отрасли, среди которых важнейшими являются: повышение ресурсных показателей элементов энергетических установок судов за счет увеличения износостойкости поверхностей деталей, совершенствования триботехнических свойств смазок и повышения качества технической эксплуатации флота. Исследования рабочих процессов главных и вспомогательных элементов СЭУ позволят повысить их энергоэффективность за счет выбора оптимальных параметров работы, сокращения тепловых и механических потерь.

Основными направлениями научных исследований в рамках госбюджетных и хоздоговорных НИР, реализуемых в лабораториях учебно-научного центра, являются:

- снижение механических потерь в узлах трения судовых машин и механизмов путем совершенствования триботехнических условий их эксплуатации;
- повышение ресурса судовых машин и механизмов за счет обеспечения износостойкости поверхностей деталей;
- исследование влияния условий эксплуатации деталей судового энергетического оборудования на интенсивность эрозионно-коррозионных разрушений;
- снижение эксплуатационных расходов судоходных кампаний за счет продления срока эксплуатации моторных масел и теплоносителей судовых систем;
- повышение энергоэффективности судовых энергетических установок путем снижения тепловых потерь, использования вторичных и дополнительных энергетических ресурсов;
- разработка технических и организационных решений, направленных на расширение использования на флоте газовых и альтернативных топлив.

Заключение (Conclusion)

Концепция создания учебно-научного центра «Энергоэффективность и надежность судовых машин и механизмов» была представлена членам попечительского совета ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» и получила положительную оценку. В настоящее время определены этапы реализации проекта, проведена технико-экономическая оценка, определен необходимый объем финансирования.

Основные этапы реализации проекта:

I этап — разработка эскизного проекта.

II этап — проведение ремонтных работ, подготовка помещений лабораторий.

III этап — закупка оборудования.

IV этап — проведение монтажных, пуско-наладочных работ, разработка методического обеспечения.

Второй и третий этапы могут быть реализованы параллельно при наличии достаточного финансирования. Работа над проектом продолжается. Введение в действие учебно-научного центра обеспечит необходимую материальную базу для качественной подготовки на современном уровне инженерных кадров для предприятий и организаций отрасли, проведения лабораторных и практических работ, научных исследований по актуальным для предприятий отрасли направлениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Послание Президента Федеральному Собранию от 21 февраля 2023 г. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://kremlin.ru/events/president/news/70565> (дата обращения: 01.04.2023).

2. Безюков О. К. 90 лет кафедре теории и конструкции судовых ДВС (Института водного транспорта ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова) / О. К. Безюков, В. Л. Ерофеев, В. А. Жуков // Речной транспорт (XXI век). — 2021. — № 4 (100). — С. 20–25.

3. Барышников С. Подготовка специалистов транспортного профиля для участия в глобальных государственных проектах развития арктической зоны России / С. Барышников, Е. Смягликова // Транспортная стратегия — XXI век. — 2018. — № 38. — С. 48.

4. Барышников С. О. Как обучение подчинить задачам отрасли / С. О. Барышников, А. Л. Степанов // Мир транспорта. — 2017. — Т. 15. — № 1 (68). — С. 224–230.

5. Барышников С. О. Кадровый ресурс в освоении арктического региона / С. О. Барышников, И. И. Костылев, Е. А. Смягликова // Транспорт и логистика в Арктике. Северный морской путь: курс — Дальний Восток: альманах / Под ред. С. В. Новикова. — М., 2016. — С. 175–180.

6. Ивановская А. В. Профессиональная компетентность будущих специалистов в области судовой энергетики / А. В. Ивановская, В. А. Жуков, О. В. Мельник // Современные тенденции практической подготовки в морском образовании. Материалы III национальной научно-практической конференции. — Керчь: ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», 2022. — С. 72–74.

7. Ерофеев В. Л. Управление энергоэффективностью объектов морской техники и судовых двигателей внутреннего сгорания / В. Л. Ерофеев, А. Жуков, О. В. Мельник [и др.] / Под ред. В. Л. Ерофеева, В. А. Жукова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2018. — 184 с.

8. Жуков В. А. Ресурсы повышения энергоэффективности судовых энергетических установок / В. А. Жуков, И. Л. Пересецкий // Актуальные проблемы морской энергетики: материалы одиннадцатой международной научно-технической конференции. — СПб.: СПб. гос. морской техн. ун-т, 2022. — С. 203–206. DOI: 10.52899/9785883036322_203_206.

9. Брежнев В. И. Возможности использования вторичных энергетических ресурсов в судовых энергетических установках / В. И. Брежнев, В. А. Жуков // Современные тенденции практической подготовки в морском образовании: материалы III национальной научно-практической конференции, Керчь, 19–20 ноября 2021 года. — Керчь: ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», 2022. — С. 48–52.

10. Жуков В. А. Противообледенительное устройство ледокола как средство повышения энергоэффективности судна / В. А. Жуков, Е. А. Степанов, В. Л. Ерофеев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 430–439. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-430-439.

11. Безюков О. К. Газомоторное топливо на водном транспорте / О. К. Безюков, В. А. Жуков, О. И. Яценко // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 31–39.

12. Жуков В. А. Перспективы многотопливных судовых дизелей / В. А. Жуков, А. Н. Гомбалецкий // Сборник научных статей национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, 19–21 сентября 2022 года. — СПб.: ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова», 2022. — Т. 1. — С. 107–111.

13. Безюков О. К. Экономические аспекты перевода флота на газомоторное топливо / О. К. Безюков, В. А. Жуков // Актуальные проблемы экономики и управления на водном транспорте: материалы научно-практической конференции, посвященной 75-летию со дня рождения проф. А. С. Бутова. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2014. — С. 31–34.

14. Безюков О. К. Состояние и перспективы судового двигателестроения в России / О. К. Безюков, В. А. Жуков // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2017. — № 2. — С. 40–53. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-2-40-53.

15. Жуков В. А. Сравнительная оценка уровня технического развития судовых дизелей / В. А. Жуков, А. Н. Гомбалецкий // Речной транспорт (XXI век). — 2021. — № 4 (100). — С. 57–62.

REFERENCES

1. Poslanie Prezidenta Federal'nomu Sobraniyu ot 21 fevralya 2023 g. Web. 1 Apr. 2023 <<http://kremlin.ru/events/president/news/70565>>.

2. Bezyukov, O. K., V. L. Erofeev, and V. A. Zhukov. "90 let kafedre teorii i konstruktсии sudovykh DVS (Instituta vodnogo transporta GUMRF im. adm. S. O. Makarova)." *River transport (XXIst century)* 4(100) (2021): 20–25.
3. Baryshnikov, S., and E. Smyaglikova. "Podgotovka spetsialistov transportnogo profilya dlya uchastiya v global'nykh gosudarstvennykh proektakh razvitiya arkticheskoi zony Rossii." *Transportnaya strategiya — XXI vek* 38 (2018): 48.
4. Baryshnikov, Sergey O., and Andrey L. Stepanov. "How to subordinate learning to the tasks of the industry." *World of Transport and Transportation* 15.1(68) (2017): 224–230.
5. Baryshnikov, S.O., I. I. Kostylev, and E. A. Smyaglikova. "Kadrovyyi resurs v osvoenii arkticheskogo regiona." *Transport i logistika v Arktike. Severnyi morskoi put': kurs — Dal'nii Vostok. Al'manakh*. Edited by S. V. Novikov. M., 2016. 175–180.
6. Ivanovskaya, A. V., V. A. Zhukov, and O. V. Mel'nik. "Professional'naya kompetentnost' budushchikh spetsialistov v oblasti sudovoi energetiki." *Sovremennye tendentsii prakticheskoi podgotovki v morskoy obrazovanii. Materialy III natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Kerch': FGBOU VO «Kerchenskii gosudarstvennyi morskoi tekhnologicheskii universitet», 2022. 72–74.
7. Erofeev, V. L., V. A. Zhukov, O. V. Mel'nik, O. K. Bezyukov, E. V. Erofeeva, and A. A. Martynov. *Upravlenie energoeffektivnost'yu ob'ektov morskoy tekhniki i sudovykh dvigatelei vnutrennego sgoraniya*. Edited by V. L. Erofeev, and V. A. Zhukov. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2018.
8. Zhukov, V. A., and I. L. Peresetsky. "Resources for improving the energy efficiency of marine power plants." *Aktual'nye problemy morskoy energetiki. Materialy odinnadtsatoi mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. SPb.: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi morskoi tekhnicheskii universitet, 2022. 203–206. DOI: 10.52899/9785883036322_203_206.
9. Brezhnev, V. I., and V. A. Zhukov. "Vozmozhnosti ispol'zovaniya vtorichnykh energeticheskikh resursov v sudovykh energeticheskikh ustanovkakh." *Sovremennye tendentsii prakticheskoi podgotovki v morskoy obrazovanii: materialy III natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Kerch': FGBOU VO «Kerchenskii gosudarstvennyi morskoi tekhnologicheskii universitet», 2022. 48–52.
10. Zhukov, Vladimir A., Evgenij A. Stepanov, and Valentin L. Erofeev. "Anti-icing device of an icebreaker as a means of increasing the ship energy efficiency." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.3 (2022): 430–439. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-430-439.
11. 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.
12. Zhukov, V. A., and A. N. Gombalevskii. "Perspektivy mnogotoplivnykh sudovykh dizelei." *Sbornik nauchnykh statei natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S. O. Makarova»*. Vol. 1. SPb.: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Gosudarstvennyi universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova», 2022. 107–111.
13. Bezyukov, O. K., and V. A. Zhukov. "Ekonomicheskie aspekty perevoda flota na gazomotornoe toplivo." *Aktual'nye problemy ekonomiki i upravleniya na vodnom transporte. Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennaya 75-letiyu so dnya rozhdeniya professora A. S. Butova*. SPb.: GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2014. 31–34.
14. Bezjukov, Oleg Konstantinovich, and Vladimir Anatol'evich Zhukov. "State and prospects of ship engine-building in Russia." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 2 (2017): 40–53. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-2-40-53
15. Zhukov, V., and A. Gombalevskiy. "Comparative estimation of ships diesels' level of technical development." *River Transport (21st century)* 4(100) (2021): 57–62.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Безюков Олег Константинович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: okb-nayka@yandex.ru,
kaf_sdvs@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bezjukov, Oleg K. —
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: okb-nayka@yandex.ru,
kaf_sdvs@gumrf.ru

Жуков Владимир Анатольевич —

доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: va_zhukov@rambler.ru, zhukovva@gumrf.ru

Никифоров Владимир Григорьевич —

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

198035, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7

e-mail: kaf_mnt@gumrf.ru

Zhukov, Vladimir A. —

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: va_zhukov@rambler.ru, zhukovva@gumrf.ru

Nikiforov, Vladimir G. —

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: kaf_mnt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 26 апреля 2023 г.

Received: April 26, 2023.

EVALUATION OF THE OPERATING CONDITIONS OF THE STIRLING ENGINE HEAT EXCHANGERS

A. I. Petrov

Murmansk State Technical University, Murmansk, Russian Federation

The development of modern energy is inextricably linked with the further improvement of heat engines, which are still the only primary sources of mechanical energy on an industrial scale. Given the existing environmental problems, Stirling engines can be a good alternative to internal combustion engines and turbines. Of the many problems of creating such a sufficiently powerful and economical engine, it is customary to consider three main ones: 1) efficient transfer of large heat fluxes in the heater, regenerator and refrigerator; 2) creation of reliable and durable seals to hold the working fluid in the cylinder; 3) ensuring minimal friction in bearings and seals. And yet, of the three listed problems, the first should be given more attention, first of all, due to the unique conditions associated with the continuously changing thermo and mechanical loads. The instability of the loads is further complicated by the sharply different heat transfer coefficient on the external and internal heat transfer surfaces. That is, there are factors that contradict the requirements for the size of the heat transfer surface, the friction resistance of the working medium and the dead volume of the engine as a whole. In this regard, it is of interest to search for possible ways to reduce the effect of negative factors of non-stationary heat transfer in the calculation of heat exchangers. The current lack of suitable theoretical methods of calculation forces the use of semi-empirical methods. The aim of the paper is to assess the significance of the unique, characteristic of Stirling engines, the negative phenomenon of the delay in the flow of the working fluid in heat exchangers. For this purpose, a real kinematic diagram of the movement of the engine pistons with a rhombic drive by R. Meyer, created using the design program, is used. The analogue is the 4–235 type real engine of the Philips Company. In the calculations, a step-by-step procedure for calculating the time-varying parameters of the working fluid is used. The need for such a solution is due to the fact that in the rhombic drive of R. Meyer, the pistons movement and the change in the displaced volumes complexly depend on the angle of rotation of the engine shaft. In addition, the exact value of the real change in volume is possible only when the terms of the analytic equation of volume change under consideration are decomposed into a Fourier series.

Keywords: flow rate of heat exchangers, regenerator, relative length of the regenerator, porosity of the nozzle material, fluid flow delay, Meyer's rhombic drive, relative eccentricity of the drive, relative dead volume, phase angle, advance of the piston-displacer.

For citation:

Petrov, Aleksandr I. "Evaluation of the operating conditions of the Stirling engine heat exchangers." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 15.4 (2023): 658–665. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-658-665.

УДК 621.4

ОЦЕНКА УСЛОВИЙ РАБОТЫ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА

А. И. Петров

ФГАОУ ВО «Мурманский государственный технический университет»,
Мурманск, Российская Федерация

Темой исследования является развитие современной энергетики, неразрывно связанное с дальнейшим совершенствованием тепловых двигателей, которые по-прежнему остаются единственными первичными источниками механической энергии в промышленных масштабах. Отмечается, что с учетом существующих экологических проблем альтернативой двигателям внутреннего сгорания и турбинам могут стать двигатели Стирлинга. Из множества проблем создания такого достаточно мощного и экономичного двигателя принято рассматривать основные, а именно: эффективную передачу больших тепловых потоков в нагревателе, регенераторе и холодильнике; создание надежных и долговечных

уплотнений для удержания рабочего тела в цилиндре; обеспечение минимального трения в подшипниках и уплотнениях. Обращается внимание на то, что первой проблеме следует уделить большее внимание, прежде всего ввиду уникальных условий непрерывно меняющихся термомеханических нагрузок. Непостоянство нагрузок дополнительно усложняется резко отличающимися на наружных и внутренних поверхностях теплообмена коэффициента теплоотдачи. То есть возникают факторы, противоречащие требованиям к величине поверхности теплообмена, сопротивлению трения рабочего тела и мертвому объему двигателя в целом. В связи с этим представляет интерес поиск возможных путей снижения действия негативных факторов нестационарного теплообмена при расчете теплообменников. Отсутствие в настоящее время подходящих теоретических методов расчета вынуждает использовать полуэмпирические, основанные на достаточно ограниченном объеме экспериментальных исследований и требующие дальнейшей корреляции с помощью аналитических методик. Целью статьи является попытка оценить значимость уникального, свойственного двигателям Стирлинга, негативного явления задержки потока рабочего тела в теплообменниках. Для этого использовалась реальная кинематическая схема движения поршней двигателя с ромбическим приводом Р. Мейера, построенная с помощью конструкторской программы. Аналогом являлся реальный двигатель фирмы «Филипс» типа 4–235. Использовалась пошаговая процедура расчета изменяющихся по времени параметров рабочего тела. Необходимость такого решения обусловлена тем, что в ромбическом приводе Р. Мейера движение поршней и, соответственно, изменение вытесняемых объемов полостей сжатия и расширения сложно зависит от угла поворота вала двигателя, а практически точное значение реального изменения объема возможно лишь при разложении в ряд Фурье членов рассматриваемого аналитического уравнения.

Ключевые слова: проточность теплообменников, регенератор, приведенная длина регенератора, пористость насадки, задержка рабочего тела, ромбический привод Р. Мейера, относительный эксцентриситет привода, относительный мертвый объем, фазовый угол, опережение поршня-вытеснителя.

Для цитирования:

Петров А. И. Оценка условий работы теплообменников двигателя Стирлинга / А. И. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 658–665. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-658-665.

Введение (Introduction)

Известно, что с точки зрения термодинамики и теплопередачи для успешной работы двигателя Стирлинга любой модификации эффективность теплообменников имеет решающее значение. Условия работы таких теплообменных устройств связаны с непрерывно меняющимися термомеханическими нагрузками и направлениями массовых потоков рабочего тела. В связи с этим представляет интерес поиск возможных путей снижения действия негативных факторов нестационарного теплообмена при расчете теплообменников.

Имеющийся ряд экспериментальных данных и теоретических исследований крайне ограничен и эта область знаний до сих пор изучена слабо. Объем теплообменников и связанная с ними поверхность теплообмена оказывают существенное влияние на рабочие характеристики двигателя. Увеличение объема как со стороны холодильника, так и со стороны нагревателя приводит к уменьшению мощности двигателя [1]. Однако кроме термодинамических параметров, оказывающих влияние на рабочие характеристики, имеются и конструктивные, из которых наибольшее влияние оказывает фазовый угол между изменением объема горячей и холодной полости и частота вращения вала двигателя [1], [2]. В случае их увеличения наиболее негативными последствиями оказываются рост потерь от аэродинамического сопротивления движению потока рабочего тела и наличие ситуации, когда рабочее тело не успевает полностью перемещаться из горячей полости в холодную и обратно из-за так называемого эффекта «задерживания».

Возможно также сочетание эффекта «задерживания» с появлением встречных потоков рабочего тела, когда в одно и то же время оно вытекает из обоих концов регенератора [1], [2]. Быстротечность протекающих в теплообменном контуре процессов делает их все более необратимыми, ухудшая эффективность теплообменников. На практике это особенно проявляется в двигателях, работающих с частотой вращения вала в несколько тысяч оборотов в минуту [1], [2]. Очевидно, что невозможность достижения бесконечно больших значений суммарного коэффициента теплоотдачи оставляет реальным лишь два способа увеличения теплопередачи:

– увеличить площадь теплообменной поверхности, которую желательно приблизить к максимально возможной;

– увеличить время контакта рабочего тела с поверхностью теплообмена.

Для регенератора добавляется еще необходимость предельно минимизировать соотношение между теплоемкостью рабочего тела и теплоемкостью материала насадки.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Сложность рассматриваемых процессов теплообмена объясняет причину отсутствия до настоящего времени их аналитического решения. В то же время имевшиеся попытки расчетов теплообменников по хорошо известной методике Х. Хаузена или В. Типплера [3] оказались не- достаточ- но корректными. Тем не менее продолжают попытки получить новые экспериментальные данные, чтобы используя их, скоррелировать существующие критериальные уравнения по теплообмену. Например, в работе [4] предлагается использовать для расчета коэффициента трения f_R в регенераторе эмпирическую зависимость

$$f_R = \frac{175}{Re} + 1,6,$$

где Re — число Рейнольдса.

Объемный материал по систематизации и анализу конструктивных параметров существующих регенераторов выполнен в работах [5]–[9], в которых предложены также и расчетные формулы для определения характерных конструктивных параметров насадки регенератора, например, ее длины или определяющего линейного размера при вычислении критерия Нуссельта. Следует также отметить исследования Харнесса и Ньюмана [10], Хаузена [3], которые показали, что на эффективность регенератора оказывает значительное влияние задержка рабочего тела в его объеме. Для получения приемлемой эффективности, например, на уровне 70–80 %, необходимо, чтобы приведенная длина регенератора была не менее пяти. Вряд ли это условие может быть выполнено с учетом реальных максимально возможных значений коэффициента теплоотдачи при вынужденной конвекции газов, а также удельных площадях поверхности теплообмена и массовых расходах рабочего тела. Не менее важным является также факт, согласно которому пульсации давления в регенераторе ухудшают его работу [11]. Интересный подход к учету пульсаций предложен в работе [12], где гидродинамическое сопротивление в насадке рассматривалось как квазистационарное и критерием которого предложено кинетическое число Re_w — некий аналог числа Рейнольдса:

$$Re_w = \frac{w(d/2^2)}{\nu}, \quad (1)$$

где w — частота циклов;

ν — кинематическая вязкость рабочего тела;

d — диаметр проволоки материала насадки.

Заслуживает внимание работа [13], в которой предлагается физическая модель теплообмена во внутреннем контуре двигателя с кинематической схемой движения α . Понятна попытка автора использовать для этого систему дифференциальных уравнений сплошности, движения и энергии рабочего тела, описывающих конвективный теплообмен, и решать их численным методом. Однако остается нерешенным основной вопрос конвективного теплообмена: количественное определение коэффициента теплоотдачи. Используемая в модели хорошо известная критериальная зависимость для определения числа Нуссельта при поперечном обтекании (в смешанном режиме течения) шах-

матного пучка труб: $Nu = 0,41Re^{0,6} \cdot Pr_j^{0,33} \left(\frac{Pr_j}{Pr_c} \right)^{0,25}$, вряд ли с достаточной точностью отражает

теплообмен в насадке регенератора.

Корректировка критериальных уравнений, характерных для течения рабочего тела в насадках регенератора для расчета числа Нуссельта (Nu) выполнялось также в работах [14], [15]. Имеющийся

разброс полученных значений чисел Nu (при одном и том же числе Рейнольдса Re) достигает трехкратной величины. Такое расхождение вполне уязвывается с фактом существенного влияния конструкции экспериментального двигателя (установки), в частности, кинематической схемы движения рабочего поршня и вытеснителя, а также мертвых объемов. Объяснение расхождению может быть связано и с влиянием скорости потока рабочего тела на мощность двигателя. Этот эффект воздействия скорости на мощность двигателя [1] имеет нелинейный характер (в отличие от теоретической зависимости), а именно при достижении определенной величины мощность двигателя резко падает. Что касается задержки рабочего тела, то очевидно, что она однозначно связана с проточностью не только регенератора, но и всего пакета теплообменников, а поскольку в теории регенераторов теплоемкость их насадки, интенсивность теплообмена и эффективность взаимосвязаны, следует рассмотреть случай, когда одна из причин отклонения условий идеальной регенерации уменьшена. Т. е. уменьшена разность температур между насадкой и газом, при которой в идеале газ не достигает ни требуемой степени предварительного нагревания, ни предварительного охлаждения. Фактически речь может идти об уменьшении частоты вращения двигателя до значений, близких к частотам среднеоборотных или малооборотных дизелей, а следовательно, к увеличению продолжительности контакта рабочего тела с теплообменными поверхностями.

Решение поставленной задачи проведено с использованием реальной кинематической модели, построенной с помощью конструкторской программы. Прототипом является двигатель простого действия с ромбическим приводом Р. Мейера (вариант, аналогичный модели 4–235 фирмы «Филипс»). Его безусловные преимущества в полной динамической уравновешенности, бесшумности, а также исключении трения и износа уплотнительных колец от боковых усилий со стороны шатунов, делают его весьма привлекательным для применения в судовых энергетических установках. В частности, проанализирован вариант двигателя, кинематическая часть которого имеет характерные геометрические размеры деталей движения, представленные на рис. 1.

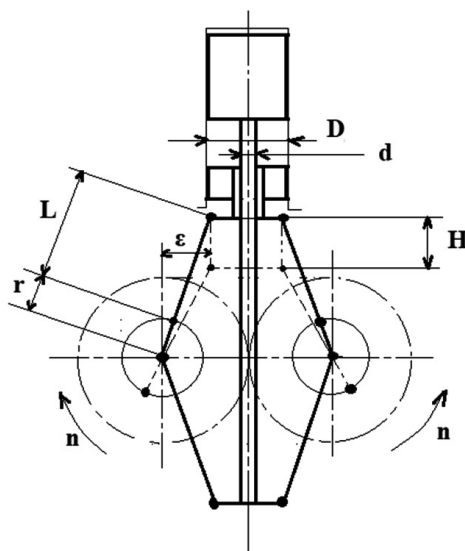


Рис. 1. Кинематическая схема ромбического привода двигателя Стирлинга

В рассматриваемом двигателе диаметр цилиндра D и ход поршня H одинаковы и равны соответственно 60 см. Диаметр штока поршня-вытеснителя $d = 7$ см. Для реализации такого хода поршней необходимы кривошипы радиусом 0,271 м и шатуны длиной 0,1438 м, эксцентриситет ε составит 0,60 м. В качестве рабочего тела выберем гелий со средним давлением в цикле $P_{cp} = 22$ МПа. Это давление соответствует опубликованному в технических характеристиках реально испытанного двигателя модели 4–235 [2]. Номинальные температуры в нагревателе и холодильнике зададим, соответственно, равными 973 К и 333 К, частоту вращения валов $n = 40$ с⁻¹. Относительный

мертвый объем χ , учитывая его влияние на мощность, по теории Шмидта, примем равным 0,5. Тогда мертвый объем цилиндра V_D составит половину от среднего значения вытесняемого объема $\bar{V}_E$:
 $V_D = 0,5 \cdot 0,785 \cdot H (2D^2 - d^2) = 168406 \text{ см}^3$.

Результаты (Results)

Для выбранной кинематической схемы и основных параметров двигателя, после выполнения пошаговой процедуры расчета изменяющихся по времени параметров потока рабочего тела, диаграмма массового расхода рабочего тела в течение цикла будет выглядеть следующим образом (рис. 2).

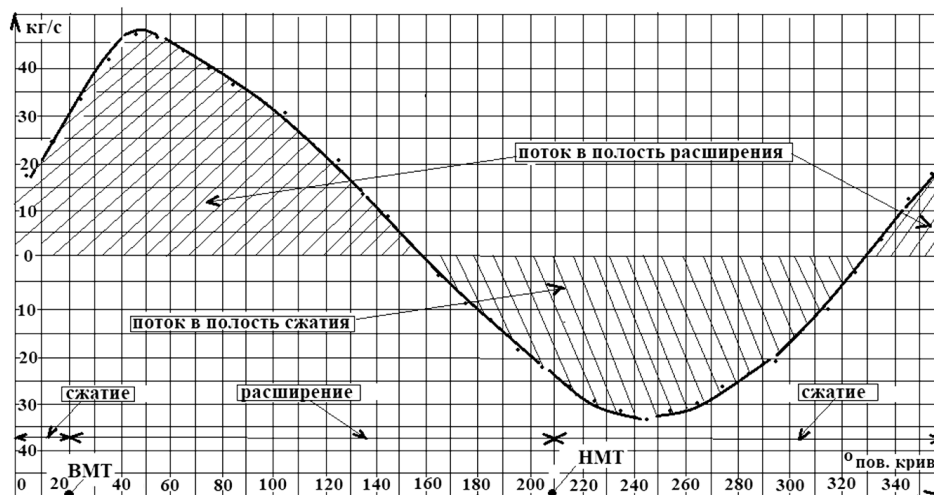


Рис. 2. Диаграмма массового расхода рабочего тела при среднем давлении цикла 22 МПа

На участке 0° – 160° поворота кривошипов поток направлен из холодной полости цилиндра в горячую через холодильник, регенератор и нагреватель. При этом работа расширения происходит от 20° , соответствующих положению рабочего поршня в верхней мертвой точке, до 210° , соответствующих нижней мертвой точке. На участке от 160° до 330° поток направлен из горячей полости в холодную через нагреватель, регенератор и холодильник, а затрачиваемая на сжатие работа будет в период от 210° до 20° .

Обсуждение (Discussion)

Следует отметить, что опережение поршня-вытеснителя над рабочим поршнем составляет в выбранном приводе угол $\alpha = 50^\circ$, что далеко от оптимального значения. На диаграмме массового расхода (см. рис. 2) отсутствуют участки, на которых поток входит и выходит и теплообменников в холодную и горячую полости. Возможность для таких потоков имеется на участках приведенной схемы в периоды 20° – 160° и 160° – 330° поворота кривошипов, т. е. в периоды, когда движение *рабочего* и *вытеснительного* поршней совпадают по направлению «вниз» или «вверх». Такое допущение можно объяснить основным отличием рабочего поршня и вытеснителя, связанным с наличием газонепроницаемого уплотнения на рабочем поршне (в частности, поршневых колец) для предотвращения утечек. Если не принимать во внимание пренебрежимо малое падение давления в кольцевом зазоре вокруг вытеснителя, то давление во всех зонах цилиндра будет одинаковым.

Факт отсутствия встречных или выходящих из мертвого объема потоков будет еще более выразительным, поскольку частота вращения двигателя в рассматриваемом варианте на порядок или более ниже той, в двигателях которых это движение вычислялось или экспериментально наблюдалось. Возвращаясь к указанным ранее исследованиям Харнесса и Ньюмана [10], а также Хаузена [3] о требованиях к приведенной длине Λ регенератора, отметим следующее:

$$\Lambda = \frac{\overline{\alpha_{\Sigma}} \cdot A}{\dot{M} c_p}, \quad (2)$$

где $\overline{\alpha_{\Sigma}}$ — среднее суммарное значение коэффициента теплоотдачи;

A — поверхность теплообмена;

$\dot{M}$ — средний массовый расход рабочего тела;

c_p — среднее значение теплоемкости рабочего тела при постоянном давлении.

Тогда учитывая известные характеристики рекуперативных и регенеративных теплообменников, получим:

$\overline{\alpha_{\Sigma}} = 500 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ — максимально возможное значение при вынужденной конвекции газов;

$A \approx 100 \text{ м}^2$, при условии, что площадь теплообмена на единицу рассматриваемого объема регенератора составляет $1800 \text{ м}^2/\text{м}^3$;

$\dot{M} = 26 \text{ кг/с}$, при выбранных параметрах рабочего объема цилиндра равна 170000 см^3 , среднем давлении цикла 22 МПа , частоте вращения 240 об/мин и рабочем теле — гелии;

$c_p = 5,2 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$.

Таким образом, получим следующее приведенное значение длины: $\Lambda = \frac{0,5 \cdot 100}{26 \cdot 5,2} = 0,37$, что не со-

ответствует требованиям, предъявляемым к конструкции достаточно эффективного регенератора с коэффициентом полезного действия, равным $70 \dots 80 \%$. Диаграмма массового расхода привлекает внимание также тем, что средние массовые расходы в периоды движения из холодной полости в горячую и из горячей в холодную неодинаковы и примерно на 40% больше при движении из холодной полости в горячую. Это обстоятельство должно быть учтено при расчете коэффициента теплопередачи в регенераторе, когда наблюдается явное неравенство произведений теплоемкостей массовых расходов рабочего тела на продолжительность периодов его нагрева или охлаждения. Особое значение при этом имеет проточность регенератора и неравномерность распределения пористости поверхности теплообмена по длине.

Приблизительную оценку энергетических возможностей рассмотренного варианта можно дать, используя известную формулу Била [2], согласно которой выходная мощность двигателя определяется по эмпирической формуле

$$N_{\text{эф}} = a n P_{\text{ср}} \frac{T_{\text{хол}}}{T_{\text{наг}}}, \quad (3)$$

где $a = 0,005$ — эмпирическая постоянная;

$\bar{V}$ — среднее значение вытесняемого объема составляет 168406 см^3 ;

n — частота вращения двигателя, об/с;

$P_{\text{ср}}$ — среднее давление в цикле;

$\frac{T_{\text{хол}}}{T_{\text{наг}}}$ — отношение температур в холодильнике и нагревателе.

Таким образом, $N_{\text{эф}} = 0,005 \cdot 168406 \cdot 4 \cdot 220 \cdot \frac{333}{973} = 253596 \text{ Вт}$.

Поскольку в компоновку включены четыре цилиндра, получим агрегатную мощность, равную 1014 кВт , что вполне приемлемо для использования в судовых энергетических установках.

Выводы (Summary)

С учетом результатов выполненного в настоящей работе моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Негативный фактор встречного или расходящегося движения потоков газа в теплообменниках может быть минимизирован или сведен к нулю при снижении частоты вращения двигателя и увеличении проточности теплообменного контура в целом.

2. При расчете теплообменников необходимо учитывать неравенство массовых расходов потока рабочего тела из холодной полости в горячую и обратно.

3. Повышение эффективности регенератора, определение соотношения длины и диаметра его насадки будут неразрывно связаны с выбором проточности и характером неравномерного распределения пористости поверхности теплообмена.

4. Создание надежной аналитической базы для расчетов теплообменников в настоящее время возможно лишь на полуэмпирическом уровне и требует новых экспериментальных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ридер Г. Двигатели Стирлинга / Г. Ридер, Ч. Хупер. — М.: Мир, 1986. — 464 с.
2. Уокер Г. Двигатели Стирлинга / Г. Уокер. — М.: Машиностроение, 1985. — 408 с.
3. Хаузен Х. Теплопередача при противотоке, прямотоке и перекрестном токе / Х. Хаузен. — М.: Энергоиздат, 1981. — 383 с.
4. Tanaka M. Flow and heat transfer characteristics of the Stirling engine regenerator in an oscillating flow / M. Tanaka, I. Yamashita, F. Chisaka // JSME international journal. Ser. 2, Fluids engineering, heat transfer, power, combustion, thermophysical properties. — 1990. — Vol. 33. — Is. 2. — Pp. 283–289. DOI: 10.1299/jsmeb1988.33.2_283.
5. Столяров С. П. К вопросу о расчетных соотношениях для регенераторов машин Стирлинга / С. П. Столяров, А. С. Столяров // Естественные и технические науки. — 2013. — № 5 (67). — С. 212–217.
6. Столяров С. П. Анализ конструктивных параметров насадок регенераторов машин Стирлинга / С. П. Столяров, А. С. Столяров // Естественные и технические науки. — 2013. — № 5 (67). — С. 206–211.
7. Савченко В. А. Повышение эффективности двигателя Стирлинга путем совершенствования элементов конструкции внутреннего контура: автореферат дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук / В. А. Савченко. — СПб.: СПбГМТУ, 2016. — 22 с.
8. Bitsikas P. CFD study of heat transfer in Stirling engine regenerator / P. Bitsikas, E. Rogdakis, G. Dogkas // Thermal Science and Engineering Progress. — 2020. — Vol. 17. — Pp. 100492. DOI: 10.1016/j.tsep.2020.100492.
9. Xiao G. Design optimization with computational fluid dynamic analysis of β -type Stirling engine / G. Xiao, U. Sultan, M. Ni, H. Peng, X. Zhou, S. Wang, Z. Luo // Applied Thermal Engineering. — 2017. — Vol. 113. — Pp. 87–102. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.10.063.
10. Harness J. B. Digital Computer Simulation of Voidage in a Regenerator / J. B. Harness, P. E. L. Neumann // Advances in Cryogenic Engineering. — New York: Springer Science+Business Media, 1980. — Vol. 35 A. — Pp. 438–445. DOI: 10.1007/978-1-4613-9856-1_53.
11. Berchowitz D. M. A new mathematical model for Stirling cycle machines / D. M. Berchowitz, C. J. Rallis, I. Urieli // 12th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. — La Grange Park, Ill., American Nuclear Society, Inc., 1977. — Vol. 2. — Pp. 1522–1527.
12. Chen N. C. J. Effects of Pressure-drop Correlations on Stirling Engine Predicted Performance / N. C. J. Chen, F. P. Griffin // 18th intersociety energy conversion engineering conference. — TN, USA: Oak Ridge National Lab., 1983. — Pp. 708–713.
13. Абакшин А. Ю. Физическая модель тепло- и массообмена во внутреннем контуре двигателя Стирлинга схемы «альфа»: автореферат дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук / А. Ю. Абакшин. — СПб.: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2014. — 17 с.
14. Liu M. Experimental study on regenerative effectiveness and flow characteristics of parallel-plate regenerator in Stirling engine / M. Liu, B. Zhang, D. Han, X. Du, H. Wang // Applied Thermal Engineering. — 2022. — Vol. 217. — Pp. 119139. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119139.
15. Yu M. Study of oscillating flows through a novel constructal bifurcation Stirling regenerator / M. Yu, F. Xin, X. Lai, H. Xiao, Z. Liu, W. Liu // Applied Thermal Engineering. — 2021. — Vol. 184. — Pp. 116413. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116413.

REFERENCES

1. Reader, G. T., and C. Hooper. *Stirling Engines*. London: Cambridge University Press, 1983.
2. Walker, G. *Stirling Engines*. Oxford University Press, 1980.

3. Hausen, Helmut. *Heat Transfer in Counterflow, Parallel-Flow, and Cross-Flow*. McGraw-Hill Companies, 1983.
4. Tanaka, Makoto, Iwao Yamashita, and Fumitake Chisaka. "Flow and heat transfer characteristics of the Stirling engine regenerator in an oscillating flow." *JSME international journal. Ser. 2, Fluids engineering, heat transfer, power, combustion, thermophysical properties* 33.2 (1990): 283–289. DOI: 10.1299/jsmeb1988.33.2_283.
5. Stolyarov, S. P., and A. S. Stolyarov. "K voprosu o raschetnykh sootnosheniyakh dlya regeneratorov mashin Stirlinga." *Natural and technical sciences* 5(67) (2013): 212–217.
6. Stolyarov, S. P., and A. S. Stolyarov "Analiz konstruktivnykh parametrov nasadok regeneratorov regeneratorov mashin Stirlinga." *Natural and technical sciences* 5(67) (2013): 206–211.
7. Savchenko, V. A. Povyshenie effektivnosti dvigatelya Stirlinga putem sovershenstvovaniya elementov konstruktivnykh kontura. Abstract of PhD diss. SPb.: SPbGMTU, 2016.
8. Bitsikas, Panagiotis, Emmanouil Rogdakis, and George Dogkas. "CFD study of heat transfer in Stirling engine regenerator." *Thermal Science and Engineering Progress* 17 (2020): 100492. DOI: 10.1016/j.tsep.2020.100492.
9. Xiao, Gang, Umair Sultan, Mingjiang Ni, Hao Peng, Xin Zhou, Shulin Wang, and Zhongyang Luo. "Design optimization with computational fluid dynamic analysis of β -type Stirling engine." *Applied Thermal Engineering* 113 (2017): 87–102. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.10.063.
10. Harness, J. B., and P.E.L. Neumann. "Digital Computer Simulation of Voidage in a Regenerator." *Advances in Cryogenic Engineering*. Vol. 35 A. New York: Springer Science+Business Media, 1980. 438–445. DOI: 10.1007/978-1-4613-9856-1_53.
11. Berchowitz, D. M., C. J. Rallis, and I. Urieli. "A new mathematical model for Stirling cycle machines." *12th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*. Vol. 2. La Grange Park, Ill., American Nuclear Society, Inc., 1977. 1522–1527.
12. Chen, N. C. J., and F. P. Griffin. "Effects of Pressure-drop Correlations on Stirling Engine Predicted Performance." *18th intersociety energy conversion engineering conference*. TN, USA: Oak Ridge National Lab., 1983. 708–713.
13. Abakshin, A. Yu. Fizicheskaya model' teplo- i massoobmena vo vnutrennem konture dvigatelya Stirlinga skhemy "al'fa". Abstract of PhD diss. SPb.: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi politekhnicheskii universitet, 2014.
14. Liu, Meng, Bilin Zhang, Dongtai Han, Xueping Du, and Huanguang Wang. "Experimental study on regenerative effectiveness and flow characteristics of parallel-plate regenerator in Stirling engine." *Applied Thermal Engineering* 217 (2022): 119139. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119139.
15. Yu, Minjie, Feng Xin, Xiaotian Lai, Hui Xiao, Zhichun Liu, and Wei Liu. "Study of oscillating flows through a novel constructal bifurcation Stirling regenerator." *Applied Thermal Engineering* 184 (2021): 116413. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116413.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Петров Александр Иванович —
кандидат технических наук
ФГАОУ ВО «Мурманский государственный
технический университет»
183010, Российская Федерация, Мурманск,
ул. Спортивная, 13
e-mail: petrovai@mstu.edu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Petrov, Aleksandr I. —
PhD
Murmansk State
Technical University
13 Sportivnaya Str., Murmansk, 183010,
Russian Federation
e-mail: petrovai@mstu.edu.ru

Статья поступила в редакцию 23 марта 2023 г.
Received: March 23, 2023.

TERMINOLOGY, STRUCTURE AND MODEL OF THE ELECTRICAL SYSTEMS OPERATION PROCESS

A. V. Saushev, V. I. Smirnov, E. V. Bova

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

The content of operation as one of the most important stages of the life cycle of a technical system is revealed. The structure of the process of technical operation of electrical engineering systems is considered. The essence of the individual stages of operation is revealed, their functional purpose is given. It is shown that some fundamental concepts related to operation do not have an unambiguous interpretation. The well-known definitions of these concepts are considered and a one-digit formulation of each of them, which corresponds to the current standards, is given. Special attention is paid to the disclosure of the content of the concept of state and consideration of various types of technical states of the system. The definition of the “condition” category, the formulation of which differs from the known definitions and allows more fully and accurately solving the problems of diagnosing the studied electrical systems, is given. An important feature of this definition is that it fixes the continuous variability of the state of any system in a function of time. At the same time, stable technical conditions that differ significantly from each other and correspond to the current version of the standard are distinguished. Such states are serviceable, faulty, operable, inoperable, partially inoperable, marginal. Functional conditions that are determined by the operating modes of the system are considered. The current definitions of the most important properties and events, among which a special place is occupied by reliability, survivability, safety, failure, damage, defect, are given. For the selected technical states, a model in the form of an oriented graph is synthesized. It is shown that the actual process of an electrical system operation has two features. The first one is that the probability of transition from one state to another does not depend on the type of state the system is in at the moment. The second feature is that the time spent in each technical condition can be either deterministic or random. The conclusion about the possibility of modeling the process of changing the technical states of the system by semi-Markov models with a discrete set of states is made. A mathematical model in the form of Kolmogorov differential equations, which makes it possible to estimate the probabilities of the system being in a particular state, has been compiled.

Keywords: electrical system, operation, definitions of basic concepts, block diagram, condition, types of technical conditions, graph model, Kolmogorov equations.

For citation:

Saushev, Alexander V., Viktor I. Smirnov, and Elena V. Bova. “Terminology, structure and model of the electrical systems operation process.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 666–679. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-666-679.

УДК 621.396

ТЕРМИНОЛОГИЯ, СТРУКТУРА И МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А. В. Саушев, В. И. Смирнов, Е. В. Бова

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

Темой исследования является содержание эксплуатации как одного из важнейших этапов жизненного цикла технической системы. Рассмотрена структура процесса технической эксплуатации электротехнических систем. Раскрыта сущность отдельных этапов эксплуатации, приводится их функциональное назначение. Показано, что некоторые фундаментальные понятия, связанные с эксплуатацией, не имеют однозначного толкования. Рассмотрены известные определения этих понятий, приведены актуальные формулировки каждого из них, соответствующие действующим стандартам. Особое внимание уделяется раскрытию содержания понятия «состояние» и рассмотрению различных видов технических состояний системы. Дано определение категории «состояние», формулировка которого отличается от известных, позволяя более

полно и точно решать задачи диагностирования исследуемых электротехнических систем. Важной особенностью данного определения является то, что оно закрепляет непрерывную изменчивость состояния любой системы в функции времени. При этом выделяются качественно различающиеся друг от друга устойчивые технические состояния, соответствующие действующей редакции стандарта, такие как исправное, неисправное, работоспособное, неработоспособное, частично неработоспособное, предельное. Рассмотрены функциональные состояния, определяемые режимами работы системы. Приведены актуальные определения важнейших свойств и событий, среди которых особое место занимают надежность, живучесть, безопасность, отказ, повреждение, дефект. Для указанных технических состояний синтезирована модель в виде ориентированного графа. Показано, что реальный процесс эксплуатации электротехнической системы имеет две особенности. Первая из них состоит в том, что вероятность перехода из одного состояния в другое не зависит от вида состояния, в котором система находится в данный момент, вторая заключается в том, что время пребывания в каждом техническом состоянии может быть как детерминированным, так и случайным. Сделан вывод о возможности моделирования процесса смены технических состояний системы полумарковскими моделями с дискретным множеством состояний. Составлена математическая модель в виде дифференциальных уравнений Колмогорова, позволяющая оценивать вероятности пребывания системы в том или ином состоянии.

Ключевые слова: электротехническая система, эксплуатация, определения основных понятий, структурная схема, состояние, виды технических состояний, граф-модель, уравнения Колмогорова.

Для цитирования:

Саушев А. В. Терминология, структура и модель процесса эксплуатации электротехнических систем / А. В. Саушев, В. И. Смирнов, Е. В. Бова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 666–679. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-666-679.

Введение (Introduction)

Техническая эксплуатация является важнейшим этапом жизненного цикла любой технической системы, под которым понимается структура процесса его разработки, производства и эксплуатации, охватывающая временной интервал от возникновения идеи создания объекта до его снятия с эксплуатации. Жизненный цикл, как правило, включает следующие стадии и этапы: формирование замысла, проектирование, изготовление, эксплуатация, утилизация. От грамотно выбранной стратегии и методов проведения технической эксплуатации зависит общая эффективность работы электротехнических систем (ЭТС). Для правильной организации и эксплуатации, помимо знания норм и правил, необходимо понимание основных закономерностей изменения эксплуатационных свойств элементов ЭТС, а также методов их определения, поскольку условия использования даже однотипных ЭТС на различных объектах имеют, как правило, особенность. Например, это в полной мере относится к автономным системам и объектам водного транспорта. Поэтому для рационального построения процесса эксплуатации необходимо проведение исследований и анализ свойств ЭТС в конкретных производственных условиях.

Решить основные задачи эксплуатации ЭТС, направленные на обеспечение их безотказной (безаварийной) работы, увеличение межремонтного периода их использования, снижение трудоемкости обслуживания и эксплуатационных расходов, можно лишь при научно обоснованном управлении этим процессом, которое предполагает планирование, организацию, контроль, учет и анализ результатов наблюдений за техническим состоянием ЭТС, а также оперативное воздействие на процесс эксплуатации. Все ранее изложенное составляет предмет теории эксплуатации, которая непрерывно развивается [1]–[3]. Эксплуатация сопровождается изменением параметров элементов ЭТС. Под действием эксплуатационных нагрузок при использовании ЭТС по назначению происходит изнашивание ее элементов. Воздействие окружающей среды вызывает физическое старение элементов ЭТС как в процессе работы, так и при хранении или нахождении в резерве. Научно-технический прогресс определяет моральное старение техники, в результате которого снижается его потребительная стоимость и дальнейшая эксплуатация может оказаться экономически неэффективной. Ввиду того, что указанный комплекс факторов при совместном воздействии приводит к снижению показателей свойств ЭТС, необходимо проведение специальных мероприятий по поддержанию параметров системы в заданных пределах в соответствии с требуемыми нормами.

Для решения различных задач в области технической эксплуатации ЭТС необходимо однозначное толкование фундаментальных понятий, связанных с эксплуатацией. Вместе с тем ввод в действие новых редакций стандартов в области технической эксплуатации требует нового их осмысления и устранения различных, иногда противоречащих друг другу формулировок. Многочисленные исследования, посвященные решению задач технической эксплуатации ЭТС [4]–[6], часто основаны на базисных понятиях, не имеющих однозначного толкования, что не позволяет корректно сравнивать полученные результаты и в ряде случаев использовать разработанные методы и алгоритмы для решения конкретной практической задачи.

Целью работы является исследование основных понятий теории эксплуатации на основании действующих стандартов, раскрытие важнейших этапов технической эксплуатации ЭТС, а также построение модели, описывающей смену технических состояний ЭТС в процессе эксплуатации.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Общие требования, задачи, содержание системы технической эксплуатации и требования к техническому состоянию разнообразных по своему составу и функциям ЭТС определяют действующие стандарты [7]–[10] и положения по технической эксплуатации ЭТС конкретного назначения. Под объектом понимается предмет рассмотрения, на который распространяется терминология в области технической эксплуатации. Объектом может быть сборочная единица, деталь, компонент, элемент, устройство, функциональная единица, оборудование, изделие, система, сооружение. Он может включать аппаратные средства, программное обеспечение, персонал или их комбинации. Объектом исследования в данной работе является ЭТС или ее элемент [7]. К таким системам можно, например, отнести судовую электроэнергетическую систему, систему поддержания напряжения на шинах судового синхронного генератора, систему распределения нагрузки между параллельно работающими генераторами, и электроприводы. Элементом ЭТС может быть, например, электродвигатель или преобразователь электрической энергии.

Под *эксплуатацией ЭТС*, по аналогии с эксплуатацией изделия, будем понимать стадию жизненного цикла ЭТС с момента принятия его потребителем от предприятия-изготовителя или ремонтного предприятия до отправки в ремонт или списания. При этом, согласно ГОСТ 25866–83¹, *эксплуатация* — это стадия жизненного цикла объекта, на которой реализуется, поддерживается и восстанавливается его качество. При этом эксплуатация ЭТС включает в общем случае использование по назначению, транспортировку, хранение, техническое обслуживание и ремонт. *Техническая эксплуатация* — часть эксплуатации, включающая транспортирование, хранение, техническое обслуживание и ремонт ЭТС (рис. 1).

Условия эксплуатации — это совокупность внешних воздействующих факторов, оказывающих влияние на ЭТС при его эксплуатации. Началом эксплуатации является момент ввода ЭТС в эксплуатацию, снятие с эксплуатации — событие, фиксирующее невозможность или нецелесообразность дальнейшего использования по назначению и ремонта ЭТС, документально оформленное в установленном порядке.

Управление технической эксплуатацией, включающее планирование, создание организационных структур, регулирование, контроль, учет и анализ результатов эксплуатации, должно обеспечивать выполнение основных задач технической эксплуатации; оно является составной частью процесса управления жизненным циклом технического объекта, важнейшей компонентой которого служит управление его состоянием на всех этапах и стадиях [8].

Техническое использование — это применение ЭТС по назначению с технико-экономическими показателями, предусмотренными приемо-сдаточными документами; осуществляется обслуживающим электротехническим персоналом и заключается в контроле и учете технического состояния, проверке готовности к действию, вводе и выводе из действия, обеспечении, изменении и поддержании режимов работы, сопоставлении заданных и фактических характеристик, оценке и регистрации отклонений параметров от их номинальных значений.

¹ ГОСТ 25866–83. Эксплуатация техники. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1983. 8 с.

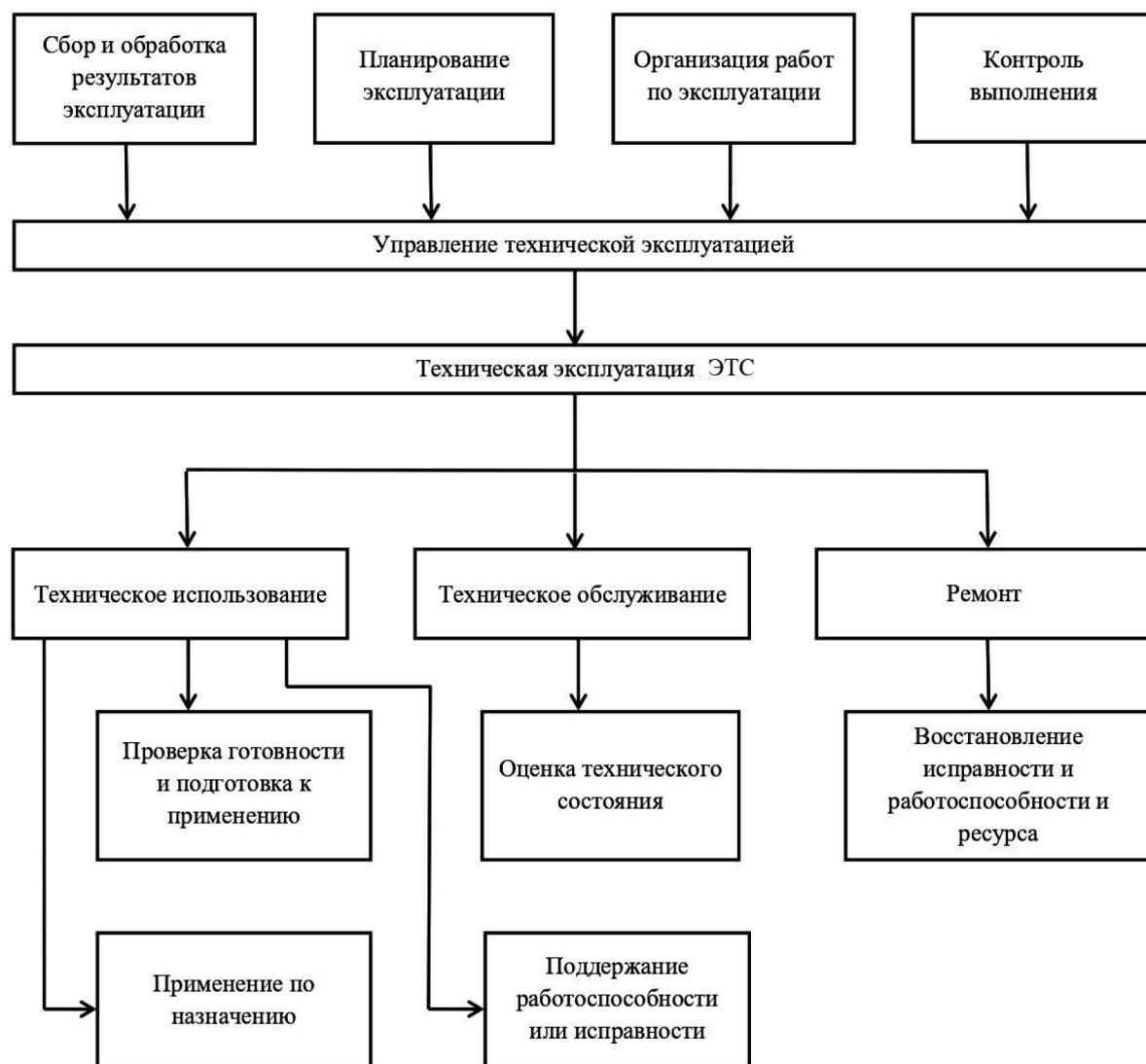


Рис. 1. Структура процесса технической эксплуатации ЭТС

Техническое обслуживание (ТО) — это комплекс технологических операций и организационных действий по поддержанию работоспособности или исправности ЭТС при использовании по назначению, ожидании, хранении и транспортировании.

Плановое ТО (другие отраслевые названия: профилактическое, регламентированное) — техническое обслуживание, выполнение которого осуществляется в соответствии с требованиями документации.

Внеплановое ТО (другие отраслевые названия: корректирующее, нерегламентированное) — техническое обслуживание, выполнение которого осуществляется по техническому состоянию объекта без предварительного назначения.

Ремонт — это комплекс технических операций и организационных действий по восстановлению исправного или работоспособного состояния объекта и восстановлению ресурса объекта или его составных частей. Ремонт включает операции локализации, диагностирования, устранения неисправности и контроль функционирования. Ремонты подразделяют на плановые и внеплановые:

- плановый ремонт выполняется по плану в соответствии с требованиями документации. Плановые ремонты по объему выполняемых работ, трудоемкости и периодичности проведения подразделяют на текущие, средние и капитальные;
- внеплановый ремонт не предусматривается планом, он может быть обусловлен отказом объекта, появлением повреждений (неисправностей), нарушением правил технической эксплуатации;

внеплановые ремонты подразделяют на аварийно-восстановительные и ремонты по состоянию объекта.

Система технического обслуживания и ремонта — это совокупность документации, персонала, организационных и технических действий, необходимых для поддержания и восстановления работоспособного состояния объекта. Операция технического обслуживания — ТО (ремонта) — отдельный вид работы, выполняемой при ТО (ремонте) с целью поддержания или восстановления работоспособности ЭТС.

Согласно ГОСТ 18322–2016¹, под техническим состоянием понимается «...совокупность свойств объекта, подверженных изменению в процессе его производства, эксплуатации, транспортировки и хранения, характеризующихся значениями параметров и / или качественными признаками, установленными в документации».

Согласно ГОСТ Р 27.102–2021², «Техническое состояние — это состояние объекта в определенный момент времени, при определенных условиях внешней среды, характеризующееся фактическими значениями параметров, установленных в документации».

Согласно ГОСТ 20911–89³, под «...техническим состоянием объекта понимается состояние, которое характеризуется в определенный момент времени, при определенных условиях внешней среды, значениями параметров, установленных технической документацией на объект».

Последние два определения, по сути, совпадают. Таким образом, объективно существуют две точки зрения относительно понятия «техническое состояние». Из первого определения следует, что возможны такие интервалы времени, при которых состояние объекта не изменяется. Кроме того, свойства объекта, по сути, являются следствием его состояния. Таким образом, под техническим состоянием ЭТС будем понимать определение, сформулированное в ГОСТ Р 27.102–2021.

К факторам, под воздействием которых изменяется техническое состояние объекта, можно отнести действия климатических условий, старение с течением времени, операции регулировки и настройки в ходе изготовления или ремонта, замену отказавших элементов и т. д. Об изменении технического состояния объекта судят по значениям диагностических (контролируемых) параметров, позволяющих определить техническое состояние объекта без его разборки.

Основными видами технического состояния согласно действующему стандарту, являются: исправное состояние, работоспособное состояние, неисправное состояние, неработоспособное состояние, частично неработоспособное состояние и предельное состояние.

Приведем определения этих понятий ввиду наличия изменений и дополнений по сравнению с предыдущей редакцией стандарта.

Исправное состояние (исправность) — состояние объекта, в котором все параметры объекта соответствуют всем требованиям, установленным в документации на этот объект.

Неисправное состояние (неисправность) — состояние объекта, в котором хотя бы один параметр объекта не соответствует хотя бы одному из требований, установленных в документации на этот объект.

Работоспособное состояние — состояние объекта, в котором значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативной и технической документации.

Неработоспособное состояние — состояние объекта, в котором значение хотя бы одного из параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции, не соответствует требованиям документации на этот объект.

Исправный объект всегда работоспособен, неисправный объект может быть как работоспособным, так и неработоспособным. Работоспособный объект может быть исправен и неисправен, неработоспособный объект всегда неисправен.

¹ ГОСТ 18322–2016. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2017. 14 с.

² ГОСТ Р 27.102–2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. М.: ФГБУ «РСТ», 2021. 36 с.

³ ГОСТ 20911–89. Техническая диагностика. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1989. 10 с.

Работоспособный объект в отличие от исправного должен удовлетворять лишь тем требованиям документации, выполнение которых обеспечивает нормальное применение объекта по назначению. При этом следует различать два принципиально разных случая:

- переход в неисправное, но работоспособное состояние произошел вследствие нарушения требований, не связанных с потенциальным снижением уровня этого состояния (например, вследствие нарушения эстетических или экологических требований);
- переход в неисправное, но работоспособное состояние произошел вследствие отказа какого-либо резервного элемента, что привело к снижению потенциальной устойчивости (уровня) этого состояния.

Для сложных объектов возможны *частично неработоспособные состояния*, при которых объект способен выполнять требуемые функции с пониженными показателями или способен выполнять лишь часть требуемых функций. Например, время переходного процесса электропривода превысило допустимое значение и в отдельных случаях он не успеет с заданным быстродействием отработать слежение за целью. Другим примером является потеря возможности электрического торможения электродвигателя. При этом в режимах пуска и рабочего функционирования электродвигатель выполняет все возложенные на него функции. Различают «внутреннее» неработоспособное состояние и «внешнее» неработоспособное состояние, обусловленное отсутствием внешних ресурсов. В работоспособном состоянии различают «рабочее состояние» и «нерабочее состояние», при котором объект не функционирует.

Рабочее состояние — это состояние объекта, в котором он выполняет хотя бы одну требуемую функцию.

Нерабочее состояние — состояние объекта, в котором он не выполняет ни одной из требуемых функций.

«Нерабочее состояние» допускается подразделять, в свою очередь, на состояние резервирования и состояние планового простоя.

Работающий объект может находиться в работоспособном или в частично неработоспособном состоянии.

Неработающий объект может находиться в любом из состояний, рассмотренных ранее, исключая рабочее и нерабочее состояния.

Следует иметь в виду, что согласно ГОСТ 20911–75 «Техническая диагностика. Основные термины и определения», который прекратил действие в 1989 г. ввиду появления новой редакции стандарта, в рассмотрение было введено еще два состояния: состояние правильного функционирования и состояние неправильного функционирования. Эти понятия часто применяются и в настоящее время.

Под *состоянием правильного функционирования* понимается вид технического состояния, в котором применяемый по назначению объект в целом или его составная часть выполняют в текущий момент времени предписанные им алгоритмы функционирования со значениями параметров, соответствующими установленным требованиям. Соответственно в *состоянии неправильного функционирования* объект не выполняет предписанные им алгоритмы функционирования со значениями параметров, соответствующими установленным требованиям.

Состояние готовности — это состояние неработающего работоспособного объекта, в котором объект может выполнять требуемые функции в заданных условиях применения при условии, что все необходимые внешние ресурсы обеспечены.

Работоспособный объект не всегда находится в состоянии готовности (при отсутствии необходимых ресурсов). Например, при отсутствии электрического питания ЭТС не может работать и, следовательно, не находится в состоянии готовности.

Предельное состояние — это состояние объекта, в котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно. Недопустимость дальнейшей эксплуатации устанавливают на основе критериев предельного состояния объекта.

Критерий предельного состояния — признак или совокупность признаков, установленных в документации, появление которых свидетельствует о возникновении предельного состояния объекта.

В зависимости от условий эксплуатации для одного и того же объекта могут быть установлены два и более критерия предельного состояния. Предельное состояние может являться результатом как внутренних процессов или причин, так и внешних воздействий на объект в процессе его функционирования. Переход объекта в предельное состояние влечет за собой временное или окончательное прекращение его эксплуатации. При достижении предельного состояния объект должен быть снят с эксплуатации, направлен в средний или капитальный ремонт, списан, утилизирован или передан для применения не по назначению. Если критерий предельного состояния установлен из соображений безопасности, хранения и / или транспортирования объекта, то при наступлении предельного состояния хранение и / или транспортирование объекта должно быть прекращено. В других случаях при наступлении предельного состояния должно быть прекращено применение объекта по назначению.

Для неремонтируемых объектов имеет место предельное состояние двух видов: первый совпадает с неработоспособным состоянием, второй обусловлен тем, что начиная с некоторого момента дальнейшая эксплуатация еще работоспособного объекта оказывается недопустимой в связи с опасностью или высокими затратами эксплуатации. Переход неремонтируемого объекта в предельное состояние второго вида происходит до потери объектом работоспособности.

Для ремонтируемых объектов выделяют два или более вида предельных состояний. Например, для двух видов предельных состояний требуется отправка объекта в средний или капитальный ремонт, т. е. временное прекращение применения объекта по назначению. Третий вид предельного состояния предполагает окончательное прекращение применения объекта по назначению. Критерии предельного состояния каждого вида устанавливаются в документации.

Опасное состояние — это состояние объекта, которому соответствует высокая вероятность или высокая значимость неблагоприятных последствий для людей, окружающей среды и материальных ценностей; может возникнуть как в результате отказа, так и в процессе работы объекта.

Состояние резервирования — нерабочее состояние работоспособного объекта, находящегося в резерве, в течение заданного периода времени.

Все рассмотренные виды технического состояния существуют на базе основного понятия «состояние», определение которого в имеющихся ГОСТах отсутствует. Анализ категории *состояние ЭТС* исследуется в работах [8], [9]. Рассмотрим лишь методологические основы данного понятия. При этом вначале необходимо определить категорию *свойство*. В дополнение к определению свойства продукции, закрепленного ГОСТ 15467–79¹, где акцентировано внимание на ее объективной особенности, которая может проявляться при ее создании, эксплуатации или потреблении, под свойством ЭТС будем прежде всего понимать ее определенность, которая обуславливает ее различие и сходство с другими системами и проявляется во взаимоотношении с ними. Согласно функционально-структурному подходу будем различать внутренние (материально-структурные) и внешние (функциональные) свойства ЭТС, которые количественно характеризуются ее внутренними и выходными параметрами.

Категория *состояние ЭТС* должна отражать внутренние свойства системы, интенсивность их проявления в различные моменты времени и фиксировать процесс развития. Дадим следующие определения: состояние — это внутренняя определенность (субстрат) ЭТС, характеризующаяся в рассматриваемый момент времени признаками, установленными технической документацией на ЭТС, которые являются начальными условиями процессов их дальнейшего изменения [12], признак — это количественная (параметры) и качественная характеристики определяющих ЭТС свойств.

Совокупность внутренних свойств ЭТС и их характеристик (рис. 2) в некоторый момент времени определяет внутреннее (материально-структурное) состояние (*МСС*), которое, в свою очередь, характеризуется сочетанием состояния комплектующих элементов (*СКЭ*) ЭТС и ее комму-

¹ ГОСТ 15467–79. Управление качеством продукции. Основные понятия, термины и определения. М.: Стандартиформ, 2009.

тационного состояния ($КС$). Коммутационное состояние определяется видом структуры системы и, в частности, положением различных переключающих устройств, связанных с пуском, реверсом, включением нагрузки, блокировки и др. Совокупность функциональных свойств и выходных параметров ЭТС в некоторый момент времени определяет его функциональное состояние ($\Phi С$). Состояние среды ($С С$) оказывает влияние на режим работы ЭТС и может быть представлено двумя группами: режимом работы ($Р Р$) (в узком смысле) и состоянием условий использования ($С У И$), которые определяются атмосферными факторами, степенью «нагруженности» элементов, а также качеством ТО и ремонта и др.

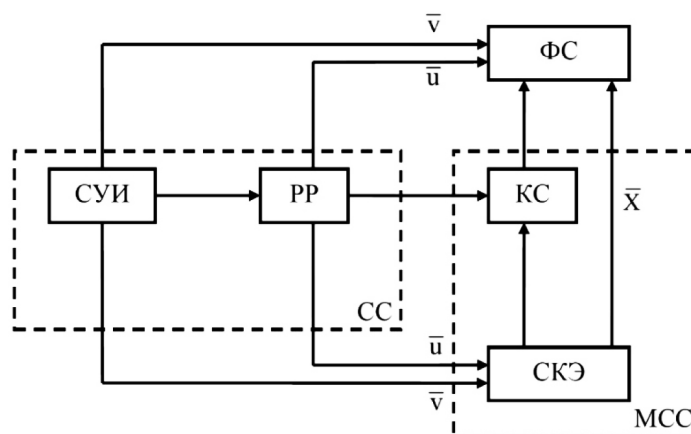


Рис. 2. Взаимосвязь классов состояний ЭТС:

$М С С$ — материально-структурное состояние;

$С К Э$ — состояния комплектующих элементов; $С С$ — состояние среды;

$С У И$ — состояние условий использования; $Р Р$ — режим работы;

$К С$ — коммутационное состояние; $\Phi С$ — функциональное состояние

Рассмотренные множества состояний ЭТС взаимосвязаны (рис. 2) и позволяют объяснить и обосновать многообразие их видов в эксплуатации. Материально-структурному уровню соответствуют *исправное состояние* и *неисправное состояние*. На функциональном уровне выделяют *работоспособное состояние* и *неработоспособное состояние* при всех возможных коммутационных состояниях ЭТС, а также *состояние правильного функционирования* и *состояние неправильного функционирования* — при определенном коммутационном состоянии (режиме) системы. Из приведенного определения состояния следует, что все его виды являются дискретными, а для класса работоспособных состояний можно выделить сколь угодно большое число состояний, различающихся значением запаса работоспособности ЭТС [10].

Качество и эффективность работы ЭТС определяются способами управления процессами формирования и сохранения ее важнейших свойств и значений параметров на всех этапах и стадиях жизненного цикла.

Мониторинг технического состояния — составная часть ТО, представляющая собой наблюдение за объектом с целью получения информации о его техническом состоянии и рабочих параметрах. Мониторинг может проводиться в процессе работы объекта непрерывно или через запланированные интервалы времени; на основе полученных данных осуществляются контроль технического состояния и оценка остаточного ресурса объекта.

Основные понятия и определения в области надежности аналогично эксплуатации установлены применительно к объекту, под которым в данной работе понимается ЭТС или ее элемент. Приведем определения важнейших понятий, характеризующих свойства и состояния технической системы, соответствующих действующему стандарту.

Надежность — свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции в заданных режимах, условиях применения, стратегиях ТО, хранения и транспортирования.

Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств.

Безотказность — свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки в заданных режимах и условиях применения.

Долговечность — свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта (ТО и Р).

Объект может перейти в предельное состояние, оставаясь работоспособным, если, например, его дальнейшее применение по назначению станет недопустимым по требованиям безопасности, экономичности и эффективности.

Ремонтпригодность — свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособности объекта путем ТО и Р.

Сохраняемость — свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции в течение и после хранения и / или транспортирования.

Для объектов, являющихся потенциальным источником опасности, важными понятиями являются «безопасность» и «живучесть». Это в полной мере относится, например, к судовым ЭТС.

Безопасность — свойство объекта при изготовлении и эксплуатации в случае нарушения работоспособного состояния не создавать угрозу для жизни и здоровья людей, а также для окружающей среды.

Несмотря на то, что безопасность не входит в общее понятие надежности объекта, при определенных условиях она тесно связана с этим понятием (например, в случае, если отказы могут привести к условиям, вредным для людей и окружающей среды сверх предельно допустимых норм).

Понятие «живучесть» занимает пограничное место между понятиями «надежность» и «безопасность» объекта. Под *живучестью* понимают свойство объекта, состоящее в его способности противостоять развитию критических отказов из дефектов и повреждений при установленной системе ТО и Р, либо свойство объекта сохранять работоспособность при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации, или свойство объекта сохранять работоспособность при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов. При этом работоспособность может быть неполной.

Безотказность в той или иной степени свойственна объекту в любом из возможных режимов его существования. В основном безотказность рассматривают применительно к использованию объекта по назначению, тем не менее во многих случаях необходима оценка безотказности при хранении и транспортировании объекта.

Необходимо отметить, что показатели безотказности вводят либо по отношению ко всем возможным отказам объекта, либо по отношению к какому-либо одному виду отказов с указанием критерия отказа. Переход из одного вида технического состояния в другой вид является событием.

Отказ — это событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта. Отказ может быть полным или частичным. Полный отказ характеризуется переходом объекта в неработоспособное состояние, частичный отказ — переходом объекта в частично неработоспособное состояние.

Повреждение — это нарушение исправного состояния объекта при сохранении его работоспособного состояния.

Дефект — это каждое отдельное несоответствие объекта требованиям, установленным в документации.

При наличии дефекта по меньшей мере один из показателей качества или параметров объекта вышел за предельное значение или не выполняется одно из требований нормативной документации. Термин «дефект» в основном применяется при контроле качества объекта на стадии изготовления, а также при ремонте (например, при дефектации преобразователя электрической энергии, составлении ведомостей дефектов, СУИ контроле качества отремонтированного преобразователя).

Термин «неисправность», означающий нахождение объекта в неисправном состоянии, применяется при использовании, хранении и транспортировании конкретных элементов ЭТС. Находясь в неисправном состоянии объект имеет один или несколько дефектов. Термин «неисправность», в отличие от термина «дефект», распространяется не на любые объекты (например, неисправностями не называют недопустимые отклонения параметров материалов электродвигателя или параметров масла в трансформаторе).

Следует отметить, что отказ объекта может возникнуть в результате наличия одного или нескольких дефектов, но появление дефектов не всегда означает, что имеет место отказ. Таким образом, дефект, как и неисправность, в зависимости от их влияния на техническое состояние объекта может означать как повреждение, так и отказ. Дефект и /или повреждение могут служить причиной возникновения частичного или полного отказа объекта. Наличие дефекта и /или повреждения приводит объект в неисправное состояние.

Результаты (Results)

В процессе эксплуатации ЭТС ее технические состояния меняются. При этом, на основании рассмотренных ранее определений, можно выделить: исправное состояние C_1 ; работоспособное состояние C_2 ; частично неработоспособное состояние C_3 ; неработоспособное состояние C_4 . Таким образом, в процессе эксплуатации ЭТС может находиться в одном из четырех качественно различающихся друг от друга технических состояний, причем переход из одного состояния в другое может происходить вследствие структурных и параметрических возмущений [12]. Переход в предельное состояние может произойти из любого из состояний: C_1 – C_4 . При этом эксплуатация ЭТС прекращается и она направляется в ремонт или утилизируется.

Представим рассматриваемый процесс смены технических состояний, имеющих место в процессе эксплуатации ЭТС, формализованной моделью в виде ориентированного графа (рис. 3) $J = (C, L)$, где множеству вершин $C = \{C_1, C_2, C_3, C_4\}$ соответствует множество технических состояний, а множеству дуг $L \in C \times C$ — множество направленных переходов при смене этих состояний.

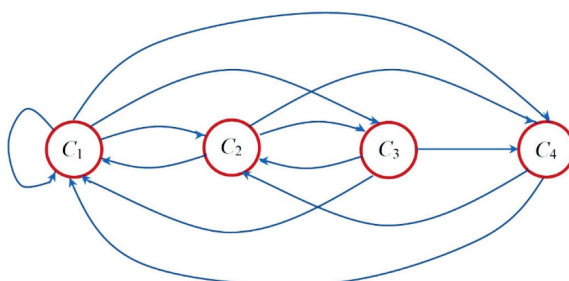


Рис. 3. Граф возможных состояний ЭТС в процессе технической эксплуатации

Для анализа возможных вариантов организации эксплуатации ЭТС выделим на графе J все возможные элементарные контуры. С каждым контуром свяжем базисный вариант эксплуатации. Число базисных вариантов будет равно цикломатическому числу графа [12].

Цикломатическое число $\mu(J)$ графа $J = (C, L)$ определяется по формуле

$$\mu(J) = \text{card}(L) - \text{card}(C) + r(J),$$

где $\text{card}(L)$ — число дуг;

$\text{card}(C)$ — число вершин;

$r(J)$ — число компонент связности графа.

Для приведенного на рис. 3 графа получим: $\text{card}(L) = 12$; $\text{card}(C) = 4$; $r(J) = 1$, $\mu(J) = 9$.

Рассмотрим полученные девять базисных вариантов смены технических состояний ЭТС. При этом каждый базисный вариант будем обозначать символом исходного графа с указанием последовательности вершин, образующих контур, а его порядковый номер — нижним индексом.

Вариант 1. $J_1 = (C_1, C_1)$.

В этом варианте ЭТС находится в течение всего срока службы в исправном состоянии.

Вариант 2. $J_2 = (C_1, C_2, C_1)$.

ЭТС находится в исправном состоянии, но периодически переходит в работоспособное состояние. После восстановления возвращается в исправное состояние.

Вариант 3. $J_3 = (C_1, C_2, C_3, C_1)$.

В отличие от предыдущего варианта ЭТС после работоспособного состояния переходит в частично неработоспособное состояние вследствие внезапного или постепенного отказа, после чего в результате мероприятий по восстановлению переходит в исходное (исправное) состояние.

Вариант 4. $J_4 = (C_1, C_2, C_4, C_1)$.

В отличие от варианта 3 после работоспособного состояния ЭТС переходит в неработоспособное состояние, а затем (после восстановления) в исходное (исправное) состояние.

Вариант 5. $J_5 = (C_1, C_3, C_4, C_1)$.

ЭТС из исправного состояния переходит в частично неработоспособное состояние, затем в неработоспособное состояние и после восстановления возвращается в исправное состояние.

Вариант 6. $J_6 = (C_1, C_3, C_1)$.

В отличие от варианта 2 ЭТС из исправного состояния периодически переходит в частично работоспособное состояние, а затем (после восстановления,) возвращается в исходное состояние.

Вариант 7. $J_7 = (C_1, C_4, C_1)$.

Аналогично варианту 6, только вместо частично работоспособного состояния ЭТС периодически пребывает в неработоспособном состоянии.

Вариант 8. $J_8 = (C_1, C_3, C_2, C_1)$ или $J_8 = (C_1, C_3, C_2)$.

ЭТС из исправного состояния переходит в частично неработоспособное состояние и после восстановления переходит в работоспособное состояние, а затем, возможно, в исправное состояние.

Вариант 9. $J_9 = (C_1, C_4, C_2, C_1)$ или $J_9 = (C_1, C_4, C_2)$.

Аналогично варианту 8, но вместо частично неработоспособного состояния ЭТС периодически находится в неработоспособном состоянии.

С помощью комбинаций рассмотренных базисных вариантов можно синтезировать различные варианты смены технических состояний ЭТС, общее число которых $N = \sum_{k=1}^{10} C_{10}^k = 2^{10} - 1 = 511$.

Реальный процесс эксплуатации ЭТС имеет две особенности. Первая состоит в том, что в рассмотренном графе смены технических состояний направления перехода зависят в основном от состояния ЭТС и практически не зависят от состояний, в которых система уже побывала. Вторая особенность заключается в том, что время пребывания в каждом техническом состоянии может быть как детерминированным, так и случайным, а переходы между состояниями обусловлены как постепенными, так и внезапными отказами. Отсюда следует возможность моделирования процесса смены технических состояний ЭТС полумарковскими моделями с дискретным множеством состояний [11], [12].

Граф многорежимной эксплуатации ЭТС, приведенный на рис. 3, является *сильно связанным*, так как содержит только сообщающиеся состояния. Отсюда следует, что полумарковский процесс, заданный на данном графе, является эргодическим. Вершинами графа являются различные технические состояния, дугами — интенсивности перехода из одного состояния в другое.

По аналогии с работой [12] может быть рассмотрена задача управления процессом изменения состояний, осуществляемая изменением вероятностей переходов полумарковского процесса. Математическая модель функционирования ЭТС, на основании которой можно, например, рассчитать вероятности пребывания системы в том или ином состоянии составляется на основе уравнений Колмогорова и имеет вид:

$$\begin{aligned}\frac{dP[C_1(t)]}{dt} &= \lambda_{2-1}P[C_2(t)] + \lambda_{3-1}P[C_3(t)] + \lambda_{4-1}P[C_4(t)] - (\lambda_{1-2} + \lambda_{1-3} + \lambda_{1-4})P[C_1(t)]; \\ \frac{dP[C_2(t)]}{dt} &= \lambda_{1-2}P[C_1(t)] + \lambda_{3-2}P[C_3(t)] + \lambda_{4-2}P[C_4(t)] - (\lambda_{2-1} + \lambda_{2-3} + \lambda_{2-4})P[C_2(t)]; \\ \frac{dP[C_3(t)]}{dt} &= \lambda_{1-3}P[C_1(t)] + \lambda_{2-3}P[C_2(t)] - (\lambda_{3-1} + \lambda_{3-2} + \lambda_{3-4})P[C_3(t)]; \\ \frac{dP[C_4(t)]}{dt} &= \lambda_{1-4}P[C_1(t)] + \lambda_{2-4}P[C_2(t)] + \lambda_{3-4}P[C_3(t)] - (\lambda_{4-1} + \lambda_{4-2})P[C_4(t)]; \\ P[C_1(t)] &= 1 - P[C_2(t)] - P[C_3(t)] - P[C_4(t)].\end{aligned}$$

Для определения стационарных вероятностей пребывания ЭТС в рассмотренных состояниях производные в левой части системы уравнений приравниваются нулю.

Заключение (Conclusion)

Приведенные определения базовых понятий теории эксплуатации позволили исключить неоднозначность их понимания и толкования. Дано определение категории «состояние», формулировка которого отличается от известных определений и позволяет более полно и точно решать задачи диагностирования ЭТС. Принципиальным моментом в определении категории состояния является то, что оно непрерывно меняется в функции времени. При этом можно выделить устойчивые состояния, качественно отличающиеся друг от друга. Такими техническими состояниями являются исправное, неисправное, работоспособное, неработоспособное, частично неработоспособное и предельное состояния. Рассмотрены также функциональные состояния, определяемые режимами работы ЭТС и актуальные определения важнейших свойств и событий, среди которых особое место занимают надежность, живучесть, безопасность, отказ, повреждение и дефект.

Для выделенных технических состояний модель синтезирована в виде ориентированного графа и составлена математическая модель в виде дифференциальных уравнений Колмогорова, позволяющая оценивать вероятности пребывания ЭТС в том или ином состоянии.

На основе определения категории состояния, рассмотренных технических состояний и составленной математической модели могут быть синтезированы математические модели для конкретных ЭТС и определены вероятностей пребывания системы в том или ином техническом состоянии. Для решения этой задачи необходимы статистические данные об изменении параметров конкретных ЭТС. Такая информация может быть получена в результате постоянного мониторинга ЭТС и формирования базы данных, на основе которой могут быть с заданной достоверностью определены интенсивности переходов от одного технического состояния к другому.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маркин И. Н. Стратегии эксплуатации и организации системы технического обслуживания и ремонта сложных технических систем / И. Н. Маркин // Наука и техника транспорта. — 2016. — № 3. — С. 53–55.
2. Орешин Н. А. Методика оптимизации процесса оценки вида технического состояния объектов технической эксплуатации / Н. А. Орешин, А. Н. Орешин // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Информационные системы и технологии. — 2006. — № 1–1. — С. 155–157.
3. Северцев Н. А. Мониторинг качества функционирования сложных технических систем в процессе их эксплуатации / Н. А. Северцев, В. В. Шипилов // Вопросы теории безопасности и устойчивости систем. — 2016. — № 18. — С. 66–74.
4. Дрогайцев В. С. Средства обеспечения эксплуатации электротехнических комплексов по техническому состоянию / В. С. Дрогайцев, В. А. Ушаков, Р. Е. Куликов // Вестник Саратовского государственного технического университета. — 2014. — Т. 2. — № 1 (75). — С. 210–213.

5. Жуковский Ю. Л. Оценка технического состояния и остаточного ресурса электромеханического агрегата с асинхронным двигателем / Ю. Л. Жуковский, Н. А. Королёв, И. С. Бабанова // Горное оборудование и электромеханика. — 2017. — № 6 (133). — С. 20–25.
6. Саушев А. В. Структура процесса управления состоянием сложных электротехнических систем / А. В. Саушев // Надежность и качество сложных систем. — 2013. — № 3 (3). — С. 23–30.
7. Саушев А. В. Морфологический анализ категории «электротехническая система» / А. В. Саушев // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 193–201. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-193-201.
8. Саушев А. В. Основы управления состоянием электротехнических систем объектов водного транспорта: монография / А. В. Саушев. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2015. — 215 с.
9. Фрумкин А. М. К определению понятия состояния для процессов и событий / А. М. Фрумкин // Ученые записки: электронный научный журнал Курского государственного университета. — 2013. — № 2 (26). — С. 1–13.
10. Саушев А. В. Показатели надежности при параметрическом синтезе автоматизированных электроприводов / А. В. Саушев, Е. В. Бова, Г. Л. Демидова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 597–607. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-597-607.
11. Пюкке Г. А. К вопросу об использовании марковской модели деградации при диагностировании технических систем / Г. А. Пюкке // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. — 2017. — № 3 (19). — С. 50–60. DOI: 10.18454/2079-6641-2017-19-3-50-60.
12. Емелин Н. М. Марковская модель оценки безопасности эксплуатации сложных технических систем / Н. М. Емелин // Двойные технологии. — 2021. — № 1 (94). — С. 23–25.

REFERENCES

1. Markin, I. N. “Strategii ekspluatatsii i organizatsii sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta slozhnykh tekhnicheskikh system.” *Nauka i tekhnika transporta* 3 (2016): 53–55.
2. Oreshin, N. A., and A. N. Oreshin. “Metodika optimizatsii protsessa otsenki vida tekhnicheskogo sostoyaniya ob’ektov tekhnicheskoi ekspluatatsii.” *Izvestiya Orlovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Informatsionnye sistemy i tekhnologii* 1–1 (2006): 155–157.
3. Severtsev, N. A., and V. V. Shipilov. “Monitoring the quality of functioning complex technical systems during their operation.” *Voprosy teorii bezopasnosti i ustoychivosti sistem* 18 (2016): 66–74.
4. Drogaytsev, V. S., V. A. Ushakov, and R. E. Kulikov. “Ensuring operation of electrotechnical complexes according to technical conditions.” *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 2.1(75) (2014): 210–213.
5. Zhukovsky, Yu. L., N. A. Korolev, and I. S. Babanova. “Estimation of the technical state and residual resource of electromechanical unit with asynchronous motor.” *Mining Equipment and Electromechanics* 6(133) (2017): 20–25.
6. Saushev, A. V. “Struktura protsessu upravleniya sostoyaniem slozhnykh elektrotekhnicheskikh system.” *Nadezhnost’ i kachestvo slozhnykh sistem* 3(3) (2013): 23–30.
7. Saushev, Aleksandr Vasilevich. “Morphological analysis of category electrotechnical system.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(29) (2015): 193–201. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-193-201.
8. Saushev, A. V. *Osnovy upravleniya sostoyaniem elektrotekhnicheskikh sistem ob’ektov vodnogo transporta: monografiya*. SPb.: GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2015.
9. Frumkin, A. M. “K opredeleniyu ponyatiya sostoyaniya dlya protsessov i sobytii.” *Uchenye zapiski. Elektronnyi nauchnyi zhurnal Kurskogo gosudarstvennogo universiteta* 2(26) (2013): 1–13.
10. Saushev, Alexander V., Elena V. Bova, and Galina L. Demidova. “Reliability indicators at parametrical synthesis of the automated electric drives.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 597–607. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-597-607.
11. Pyukke, G. A. “To the question of the use of Markov model degradation in the diagnosis technical systems.” *Bulletin KRASEC. Physical and Mathematical Sciences* 3(19) (2017): 50–60. DOI: 10.18454/2079-6641-2017-19-3-50-60.
12. Emelin, Nikolay. “Markov model for assessing the safety of operation of complex technical systems.” *Dvoynye tekhnologii* 1(94) (2021): 23–25.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Саушев Александр Васильевич —

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

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: saushev@bk.ru, SaushevAV@gumrf.ru

Смирнов Виктор Иванович — аспирант

Научный руководитель:

Саушев Александр Васильевич
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: V.S.@d-i.su, kaf_electroprivod@gumrf.ru

Бова Елена Владимировна —

доцент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: elena.bova2015@bk.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Saushev, Alexander 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: saushev@bk.ru, SaushevAV@gumrf.ru

Smirnov, Viktor I. — Postgraduate

Supervisor:

Saushev, Alexander V.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation

e-mail: V.S.@d-i.su, kaf_electroprivod@gumrf.ru

Bova, Elena V. —

Associate professor

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation

e-mail: elena.bova2015@bk.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 12 мая 2023 г.

Received: May 12, 2023.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-680-691

METHOD FOR THE FORMATION OF ALGORITHM ELEMENTS FOR DESIGNING A VESSEL FOR THE SUBSEA TECHNICAL OPERATIONS SUPPORT USING A DATABASE OF SIMILAR VESSELS

O. M. Abdullayev

Design-Research and Scientific-Investigation Institute of Caspian Sea Transport,
Baku, Azerbaijan

The elements of the algorithm for designing vessels for underwater technical work such as formation of the power station of the designed vessel are considered in the paper. These are formation of the power station of the designed vessel, selection and installation of crane and diving equipment, hardware intended for use on a vessel of manned submersibles and determining the dimensions of mobile operation equipment intended for future installation on a vessel being designed to perform appropriate technological operations on the sea shelf, based on the data of a group of the same type vessels. The algorithm is intended for definition of the main dimensions of the designed vessel, namely, a number of the installed diesel generators and ratios of total power of the power station with a width, loading capacity of the crane and power of a propulsive complex of the designed vessel. Systematization of the used crane equipment as for performance of cargo and underwater and technical works, and for hardware service is performed. Systematization of a diving complex, hardware and the manned submersibles assumed to use on the vessel is also performed. The relation between the dimensions of the main deck and ship structures necessary for the installation of mobile technological equipment and complexes using databases of the same type of vessels is systematized. Using the existing design experience and a database of ships of similar purpose, a formula that allows, as a first approximation, to estimate the sizes of the power plant, load-lifting devices and diving equipment planned for installation on the designed vessel that provides service to submersibles of any type has been compiled.

Keywords: Subsea operation, subsea construction vessel, remote operation vehicle, autonomy operation vehicle, manned submersible vehicle, diving equipment, technology equipment.

For citation:

Abdullayev, Oyrad Mamedragim. "Method for the formation of algorithm elements for designing a vessel for the subsea technical operations support using a database of similar vessels." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 680–691. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-680-691.

УДК 629.5

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АЛГОРИТМА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДНА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОДВОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РАБОТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАЗЫ ДАННЫХ ОДНОТИПНЫХ СУДОВ

О. М. Абдуллаев

Каспийский морской транспортный проектно-изыскательный
и научно-исследовательский институт (КАСПМОРИИПРОЕКТ), Баку, Азербайджан

В работе рассмотрены элементы алгоритма проектирования судов обеспечения подводно-технических работ, такие как формирование энергетической установки проектируемого судна, выбор и установка кранового и водолазного оборудования, аппаратных средств, предназначенных для использования на судне

обитаемых подводных аппаратов и определения габаритов мобильного технологического оборудования, предполагаемого к перспективной установке на проектируемом судне для выполнения соответствующих технологических операций на морском шельфе, на базе данных группы однотипных судов. Отмечается, что алгоритм предназначен для определения главных размерений проектируемого судна: количества устанавливаемых дизель-генераторов и соотношений суммарной мощности энергетической установки с шириной, грузоподъемностью крана и мощностью пропульсивного комплекса проектируемого судна. Выполнена систематизация используемого кранового оборудования как для проведения грузовых и подводно-технических работ, так и для обслуживания аппаратных средств, а также систематизация водолазного комплекса, аппаратных средств и предполагаемых к использованию на судне обитаемых подводных аппаратов. Систематизирована связь размеров главной палубы и судовых конструкций, необходимых для установки мобильного технологического оборудования и комплексов с использованием баз данных однотипных судов. На основе существующего опыта проектирования и базы данных близких по назначению судов составлена формула, позволяющая в первом приближении оценить размеры энергетической установки, грузоподъемных устройств и водолазного оборудования, планируемых к установке на проектируемое судно, обеспечивающее обслуживание подводных аппаратов любого типа.

Ключевые слова: подводно-технические работы, судно обеспечения, телеуправляемый подводный аппарат, обитаемый подводный аппарат, технологическое оборудование.

Для цитирования:

Абдуллаев О. М. Метод формирования элементов алгоритма проектирования судна обеспечения подводно-технических работ с использованием базы данных однотипных судов / О. М. Абдуллаев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 680–691. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-680-691.

Введение (Introduction)

В настоящей работе выполнено описание методики проектирования судов обеспечения подводно-технических работ с использованием базы данных однотипных судов. В работе рассмотрены методы формирования энергетической установки судов обеспечения подводно-технических работ и выбора кранового оборудования с использованием базы данных близких по назначению судов, являющихся неотъемлемой частью техники, обеспечивающей проведение подводно-технических работ.

Рассмотрен выбор водолазного оборудования и аппаратных средств для подводно-технических работ с использованием базы данных близких по назначению судов. При наличии методики формирования элементов проектируемого судна можно переходить к рассмотрению вопросов проектирования судна в целом.

Для выполнения подводно-технических работ наряду с водолазной техникой используются такие современные аппаратные средства, как телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА) [1], [2], автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) [3] и обитаемые подводные аппараты (ОПА) [4]. Для успешной и безопасной эксплуатации техники, обеспечивающей подводно-технические работы, необходимы качественные и надежные суда с высоким уровнем управляемости [5]–[10]. По мере расширения морского нефтепромысла и совершенствования объектов морской инфраструктуры объем подводно-технических работ будет постоянно увеличиваться. В связи с этим потребность в судах обеспечения подводно-технических работ не утратит своей актуальности.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Формирование энергетической установки. Высокая степень энерговооруженности судов обеспечения подводно-технических работ приводит к увеличению энергетической установки и большим объемам, который она занимает на судне. Габариты энергетической установки зависят от мощности и состава главных и вспомогательных механизмов. Энергетическую установку на раннем этапе проектирования предлагается формировать с учетом факторов, указанных на рис. 1, где показана схема формирования мощности главной энергетической установки с учетом мощности пропульсивного комплекса, технологического оборудования и судовых потребителей.

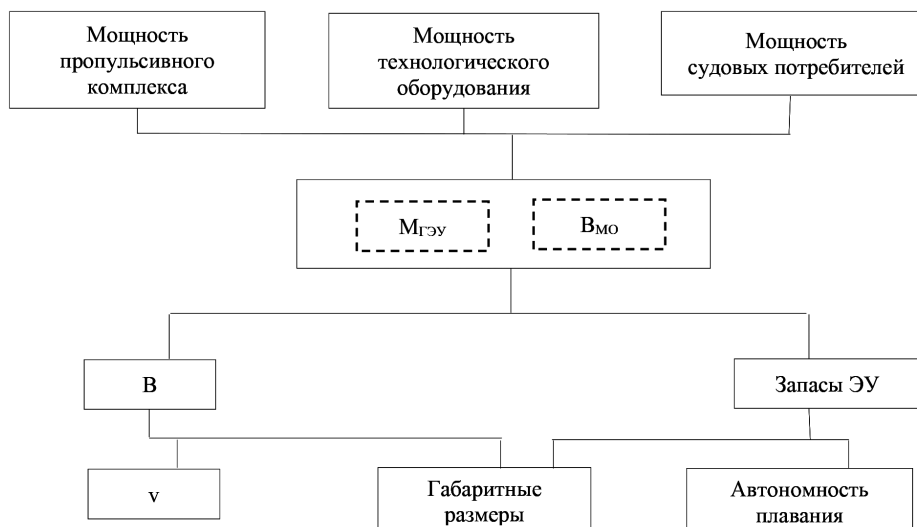


Рис. 1. Структурная схема энергетической установки судов для обеспечения подводно-технических работ

Зависимость, определяющая мощность главной энергетической установки, характеризуется следующим выражением:

$$M_{ГЭУ} = f(M_{ПК}, M_{ТО}, M_{СП}), \quad (1)$$

где $M_{ГЭУ}$ — мощность главной энергетической установки;

$M_{ПК}$ — мощность пропульсивного комплекса;

$M_{ТО}$ — мощность технологического оборудования;

$M_{СП}$ — мощность судовых потребителей.

Как показано на рис. 1, мощность главной энергетической установки зависит от габаритных размеров машинных отделений. Ширина машинного отделения непосредственно связана с мощностью главной энергетической установки, что, в свою очередь, оказывает влияние на габаритные размеры проектируемого судна:

$$B_{МО} = \sum_{i=1}^n B_i + (1n + 1), \quad (2)$$

где $B_{МО}$ — ширина машинного отделения;

B_i — ширина дизель-генератора;

n — наибольшее количество установленных по ширине машинного отделения дизель-генераторов.

Одним из факторов, оказывающих влияние на формирование размеров проектируемого судна, являются необходимые дополнительные запасы энергии, которые могут быть описаны следующей функцией:

$$S_{ЭУ} = f(T_{авт}, M_{ГЭУ}), \quad (3)$$

где $S_{ЭУ}$ — запасы энергетической установки;

$T_{авт}$ — автономность судна.

При наличии базы данных значений ширины судна величину двойного борта можно выразить в виде разности статистического значения ширины судна и ширины энергетической установки:

$$B_{ДБ} = \frac{B - B_{ЭУ}}{2}, \quad (4)$$

Ширина двойного борта с учетом судовых запасов определяется по формуле

$$B_{ДБ} = f(S_{ЭУ}), \quad (5)$$

где $B_{ДБ}$ — размер двойного борта.

С учетом выражений (2) и (4) можно записать формулу для оценки ширины судна с учетом ширины энергетической установки и двойных бортов:

$$B = \left(\sum_{i=1}^n B_i + (1n + 1) \right) + (2B_{\text{дб}}). \quad (6)$$

В ходе расчета размеров энергетической установки при проектировании судна методом использования базы данных предполагается использовать значения элементов существующих судов обеспечения подводно-технических работ. На рис. 2–4 приведены соотношения значений базы данных группы судов для обеспечения подводно-технических работ и сравнительные расчетные данные по формированию габаритов энергетической установки как элемента алгоритма проектирования перспективного судна.

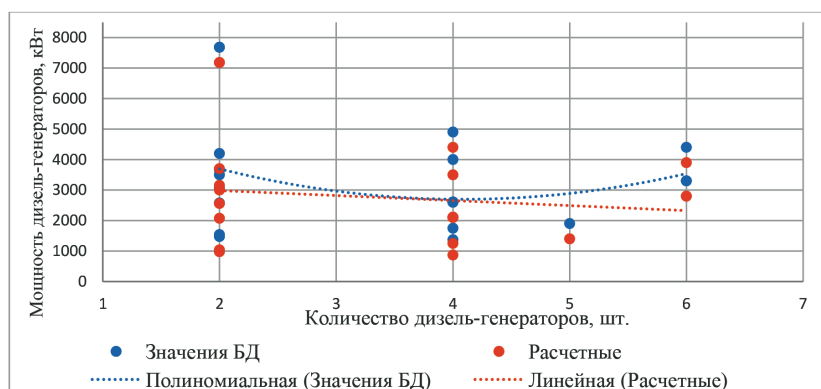
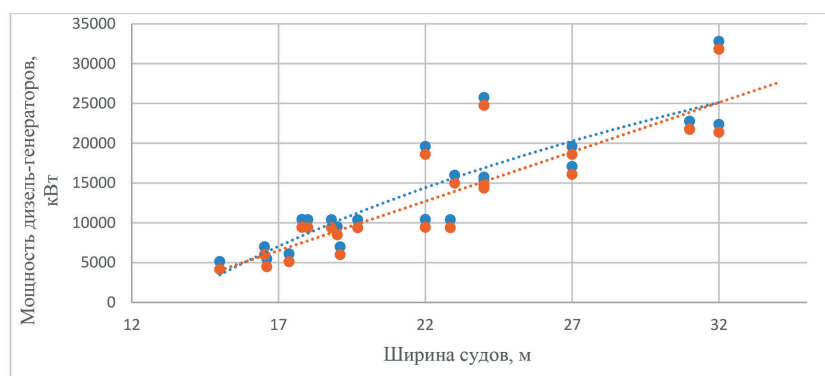


Рис. 2. Соотношение мощности и количества устанавливаемых дизель-генераторов

а)



б)

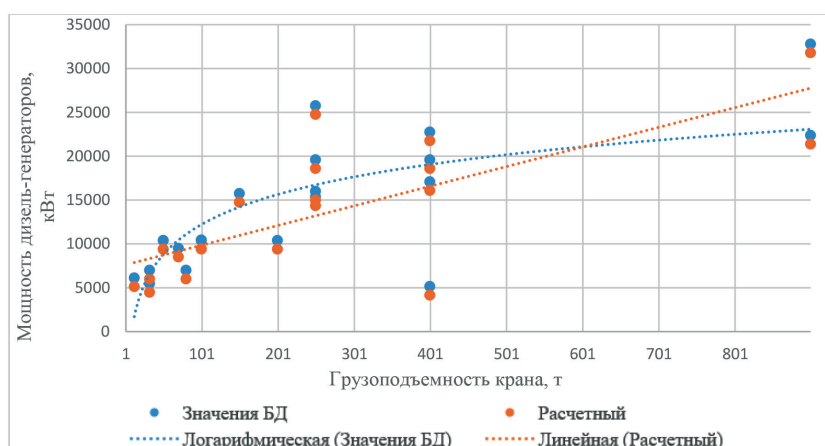


Рис. 3. Соотношение суммарной мощности энергетической установки:
а — с шириной судна; б — с грузоподъемностью главного крана

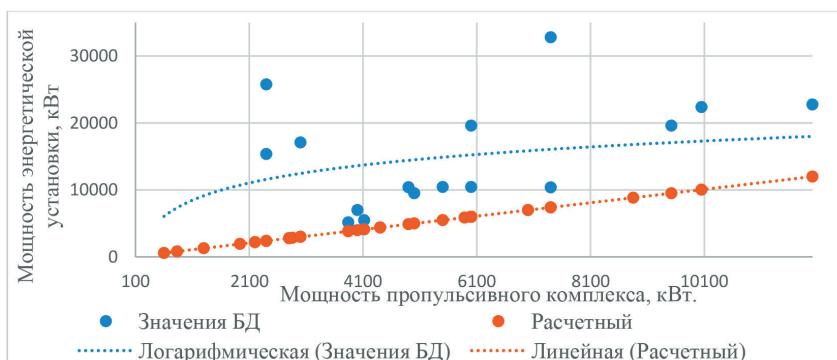


Рис. 4. Соотношение мощности пропульсивного комплекса с суммарной мощностью энергетической установки

Таким образом, систематизирована связь размеров энергетической установки судов обеспечения подводно-технических работ с главными размерениями, скоростью и автономностью плавания судна с использованием значений базы данных близких по назначению судов.

Выбор кранового оборудования. Для выполнения технологических операций на объектах морского нефтепромысла суда обеспечения подводно-технических работ обычно оснащаются необходимыми грузоподъемными средствами. В состав грузоподъемных средств на судах обеспечения подводно-технических работ входят:

- главный кран обеспечения подводно-технических работ (Subsea);
- вспомогательный кран для выполнения технологических операций;
- кран(ы) для хозяйственных нужд;
- спускоподъемные устройства для аппаратных средств и комплексов (при использовании соответствующего оборудования).

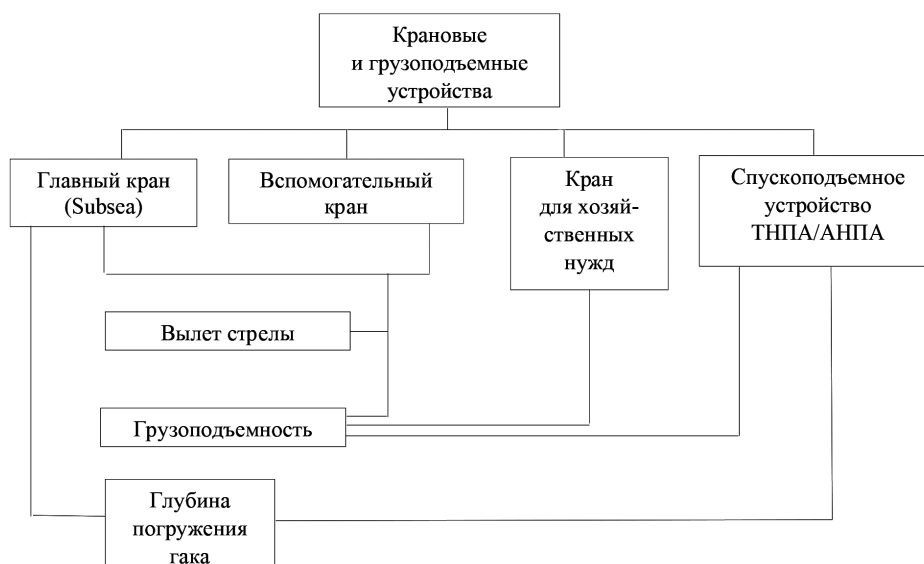


Рис. 5. Структурная схема главных параметров грузоподъемных средств, используемых на судах обеспечения подводно-технических работ

На структурной схеме (рис. 5) показаны главные параметры грузоподъемных средств, используемых на судах обеспечения подводно-технических работ, выраженные в виде следующей функции:

$$P_{\text{ГУ}} = P_{\text{ГП}} f(P_{\text{м}}, L_{\text{с}}, d_{\text{П}}), \quad (7)$$

где $P_{\text{ГУ}}$ — грузоподъемные устройства;

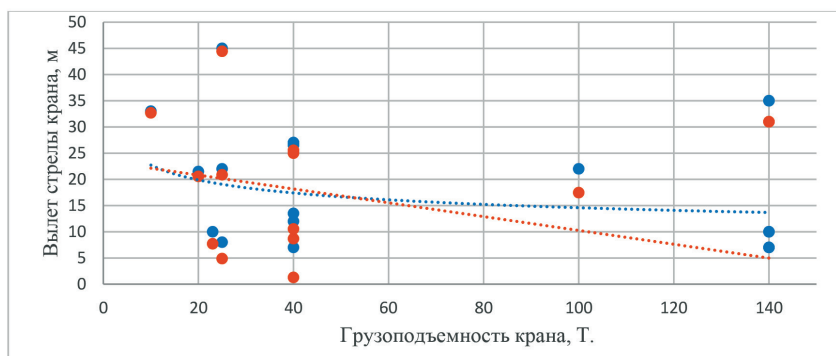
$P_{\text{ГП}}$ — грузоподъемность;

L_c — вылет стрелы;

$d_{\text{шт}}$ — глубина погружения гака.

На рис. 6 приведены соотношения значений базы данных группы судов обеспечения подводно-технических работ и сравнительные расчетные данные по выбору кранового оборудования как элемента алгоритма проектирования перспективного судна.

а)



б)

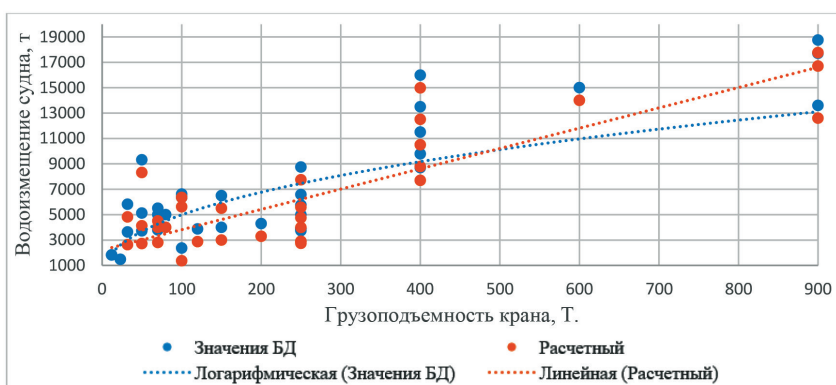


Рис. 6. Соотношения грузоподъемности крана и вылета стрелы (а) и грузоподъемности крана и водоизмещения судна (б)

Выбор водолазного оборудования. Мобильное водолазное оборудование, используемое на морском нефтепромысле, обычно бывает двух типов. Первый — воздушный водолазный комплекс для работ на глубине до 60 м, второй — сатурационный глубоководный водолазный комплекс с гелиево-кислородной смесью для работ на глубине более 60 м.

Мобильный воздушный водолазный комплекс состоит из модулей контейнерного типа:

- спуско-подъемного устройства с примерными размерами и водолазной беседкой в комплекте $\sim 2,5 \times 6$ м;
- декомпрессионной камеры $\sim 2,5 \times 6$ м;
- энергетического модуля (дизель-генератор, компрессор) $\sim 2,5 \times 6$ м;
- баллонов сжатого воздуха;
- мастерской $\sim 2,5 \times 6$ м;
- кладовой $\sim 2,5 \times 6$ м;

Количество сотрудников, обслуживающих такой комплекс, обычно составляет до 15 человек.

Мобильный глубоководный водолазный комплекс состоит из глубоководного водолазного модуля и вспомогательных модулей контейнерного исполнения:

- глубоководного водолазного модуля с размерами — $\sim 14 \times 16$ м;
- энергетических модулей (дизель-генератор, компрессор) две единицы $\sim 2,5 \times 6$ м;
- модуля газгольдера $\sim 2,5 \times 6$ м;

- кладовых ~ 4 единицы ~ $2,5 \times 6$ м;
- баллонов сжатого воздуха 15×50 л ~ 25 шт.;

Количество сотрудников, обслуживающих такой комплекс, обычно составляет до 60 человек.

Мобильные водолазные комплексы, в основном являются абсолютно независимыми от энергетической установки судна-носителя. На рис. 7 показана структурная схема необходимых конструктивных особенностей судна обеспечения подводно-технических работ для безопасной эксплуатации мобильного водолазного комплекса.

Основные спуско-подъемные устройства обычно бывают в составе мобильного водолазного комплекса. Схема спуско-подъемного устройства, необходимого для аварийного подъема водолаза из воды (рис. 7), используется в основном при эксплуатации воздушных водолазных комплексов. Судовые водолазные спуско-подъемные устройства обычно состоят из водолазного трапа и кран-балки грузо-людского исполнения.

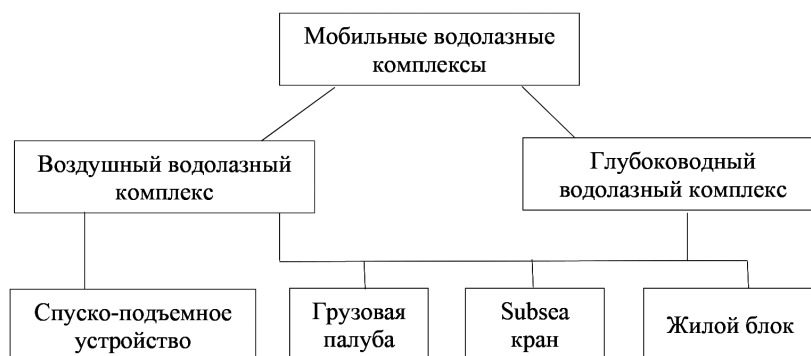


Рис. 7. Структурная схема необходимых конструктивных особенностей судов обеспечения подводно-технических работ для функционирования мобильного водолазного комплекса

Грузовая палуба, необходимая для расположения и функционирования водолазного комплекса, ограничивается габаритами судна-носителя. Формирование необходимой площади грузовой палубы выражено следующей формулой:

$$S_{\text{ГП}} = (Bf(S_{\text{ВК}})) + S_{\text{рГП}} \quad (8)$$

Здесь $S_{\text{ГП}}$ — площадь грузовой палубы;

B — ширина судна;

$S_{\text{ВК}}$ — площадь, занимаемая водолажным комплексом;

$S_{\text{рГП}}$ — площадь рабочей части грузовой палубы.

Выбор оборудования ТНПА/АНПА. Аппаратные средства — телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА) и автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), используемые на судах обеспечения подводно-технических работ, обычно могут быть как стационарного мобильного, так и смешанного исполнения. На рис. 8 показана схема необходимых конструктивных особенностей судна обеспечения подводно-технических работ для безопасного функционирования аппаратных средств. В состав стационарных аппаратных средств входят:

- пост управления аппаратными средствами;
- ангар для хранения и технического обслуживания аппаратных средств;
- пост зарядки АНПА (при использовании АНПА);
- механическая мастерская;
- электрическая мастерская;
- кладовые.

Мобильный комплекс ТНПА представлен в контейнерном исполнении, обычно рассчитан под 20-футовые контейнеры. В состав мобильных комплексов ТНПА входят:

- аппаратный контейнер (в составе аппарата и спуско-подъемного устройства);

- пост управления;
- мастерская;
- кладовая.

В случае использования комплекса АНПА на проектируемом судне должен быть предусмотрен ангар для хранения аппаратов или имеется возможность хранения на открытой палубе. При этом на судне-носителе должно быть предусмотрено штатное спуско-подъемное устройство для АНПА.

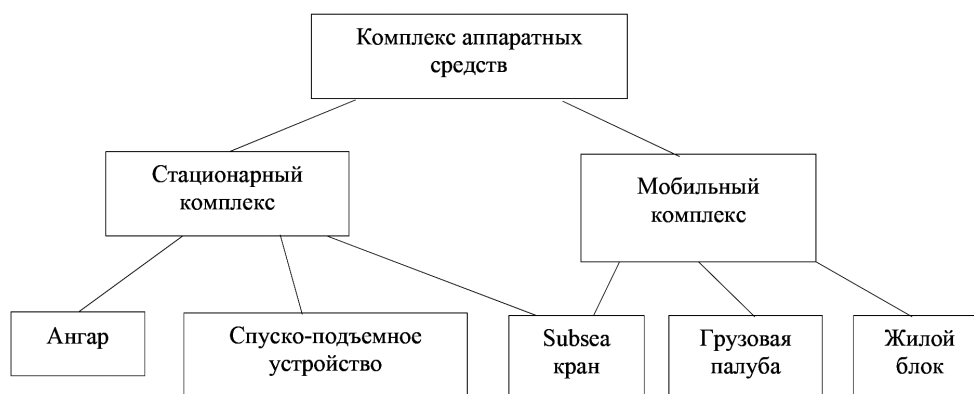


Рис. 8. Структурная схема необходимых конструктивных особенностей судов обеспечения подводно-технических работ для функционирования аппаратных средств

Грузовая палуба, необходимая для расположения и функционирования мобильных комплексов аппаратных средств, ограничивается габаритами судна-носителя. Площадь грузовой палубы при наличии данных по размерам аппаратных средств определяется выражением

$$S_{\text{ГП}} = (Bf(S_{\text{АС}})) + S_{\text{рГП}} \quad (9)$$

Здесь $S_{\text{ГП}}$ — площадь грузовой палубы;

B — ширина судна;

$S_{\text{АС}}$ — площадь, занимаемая аппаратными средствами;

$S_{\text{рГП}}$ — площадь рабочей части грузовой палубы.

Выбор обитаемых подводных аппаратов. Для успешного функционирования обитаемых подводных аппаратов (ОПА), к судам-носителям предъявляются определенные конструктивные требования. На структурной схеме (рис. 9) определена номенклатура помещений для судов обеспечения подводно-технических работ, способных обслуживать ОПА.

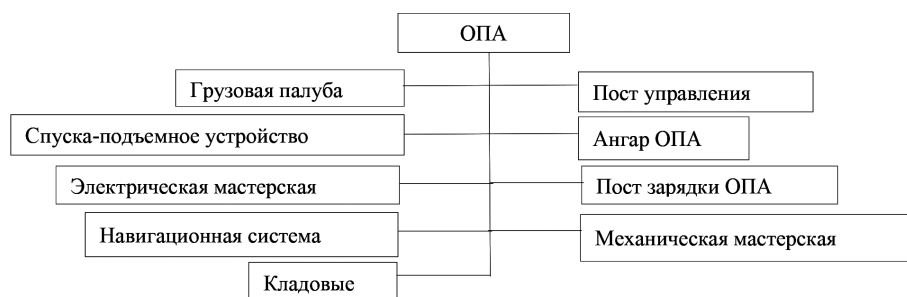


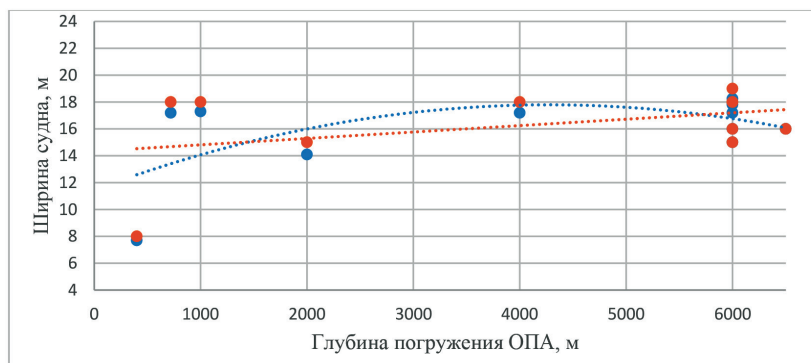
Рис. 9. Структурная схема необходимых конструктивных особенностей судов обеспечения подводно-технических работ для функционирования обитаемых подводных аппаратов

На ранних стадиях проектирования при формировании основных размерений судов обеспечения подводно-технических работ, при условии перспективного планирования использовать судно как носитель ОПА, предлагается выбирать ширину судна исходя из статистических данных ширины судов-носителей ОПА. На рис. 10 приведены сравнения значений базы данных по группе судов-носителей ОПА и расчетных соотношений глубины погружения ОПА и ширины судна. При наличии значения ширины проектируемого судна, используя соотношение на рис. 10, можно

на ранних этапах проектирования определить водоизмещение судна обеспечения подводно-технических работ, которое предполагается эксплуатировать как носитель ОПА.

Выбор оборудования, применяемого на перспективном судне, предусматривается при условии выбора главных размерений на ранней стадии проектирования на основе основных параметров ОПА, предусмотренных к применению на проектируемом судне, т. е. судно проектируется под параметры применяемого в перспективе ОПА.

а)



б)

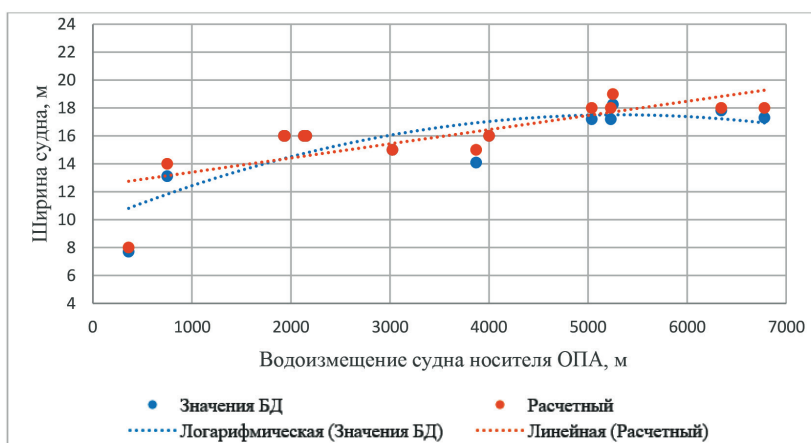


Рис. 10. Статистические соотношения глубины погружения ОПА и ширины корпуса судна (а), значения соотношений базы данных водоизмещения судна-носителя ОПА и ширины корпуса судна (б)

Определение габаритов перспективных мобильных технологических оборудования, предусмотренных к установке на судно. Для обеспечения технологических операций на морском нефтепромысле на судах, выполняющих подводно-технические работы, обычно предусматривается установка технологического оборудования, что дает возможность судну выполнять полноценные работы в соответствии с характером установленного оборудования.

В настоящей работе рассмотрены наиболее распространенные типы мобильного технологического оборудования, применяемого на судах обеспечения подводно-технических работ, к которым относится буровое оборудование для проведения инженерно-геологических и геологоразведочных работ на морском шельфе, трубоукладочное оборудование для проведения укладки и ремонта трубопроводов на морском дне и кабелеукладочное оборудования для прокладки кабелей по дну моря. На рис. 11 приведена структурная схема дополнительных конструкций для установки указанного мобильного технологического оборудования. При отсутствии четких размеров устанавливаемого оборудования необходимые размеры конструкций проектируемого судна предлагается определять по статистическим данным группы однотипных судов-прототипов.

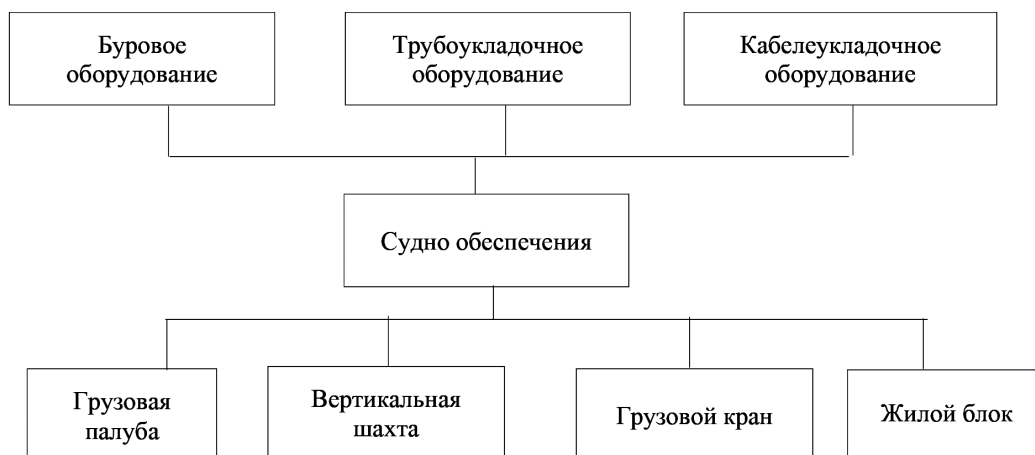
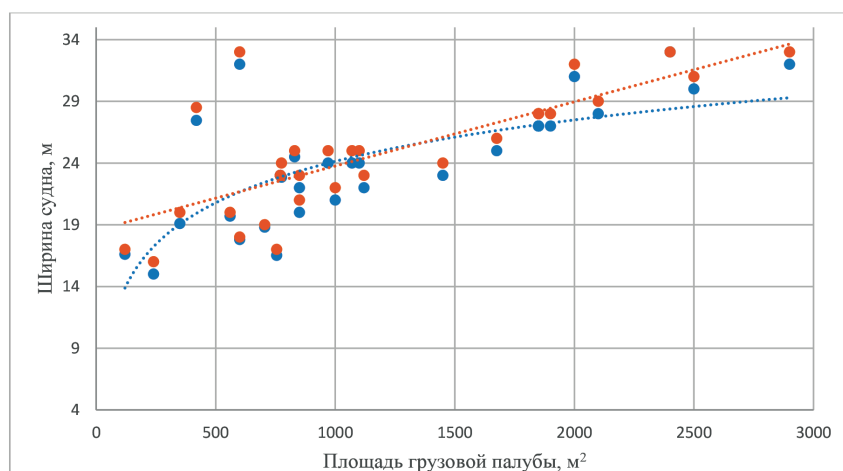


Рис. 11. Структурная схема необходимых конструктивных особенностей судов обеспечения подводно-технических работ для установки мобильного технологического оборудования

На рис. 12 приведено сравнение значений базы данных для группы судов обеспечения подводно-технических работ и сравнительные расчетные данные для определения соответствующих размеров конструкций как элемента проектирования судна.

а)



б)

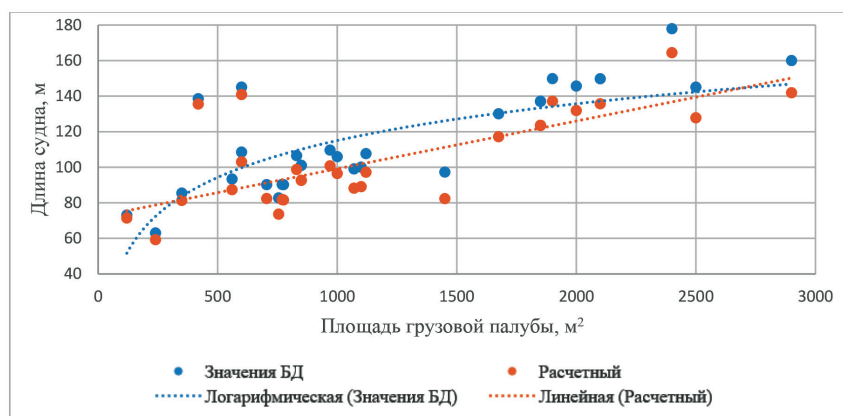


Рис. 12. Сравнение расчетных соотношений и значений базы данных площади:
а — грузовой палубы и ширины судна; б — грузовой палубы и длины судна

На графиках, приведенных на рис. 2–5, 6, 7, 10, б, 11, 12, виден одинаковый характер зависимостей, что позволяет ввести универсальное выражение для каждого исследуемого параметра в отдельности:

$$\alpha = bS - \frac{\alpha_i}{S}. \quad (10)$$

Здесь α — исследуемый параметр ($n, B_{\text{ЭУ}}, N, L_c, \Delta$):

где n — количество устанавливаемых дизель-генераторов;

$B_{\text{ЭУ}}$ — ширина судна, зависящая от мощности энергетической установки;

N — мощность энергетической установки;

L_c — вылет стрелы;

Δ — водоизмещение судна;

S — измеряемые параметры ($N, G, N_p, D_{\text{г.п}}, S_{\text{гп}}$),

где N — мощность энергетической установки;

G — грузоподъемность крана;

N_p — мощность пропульсивной установки;

$D_{\text{г.п}}$ — глубина погружения аппаратных средств;

$S_{\text{гп}}$ — площадь грузовой палубы;

b — коэффициент корреляции, учитывающий закономерность рассматриваемых соотношений, определяемый по формуле (12);

$\frac{\alpha}{S}$ — соотношения исследуемых и измеряемых параметров.

Соотношения исследуемых и измеряемых параметров определяются по формуле

$$\frac{\alpha}{S} = \sum_{i=1}^n \bar{\alpha} - b \sum_{i=1}^n S_i \quad (11)$$

$$\text{где } b = \frac{\sum_{i=1}^n (S - \bar{S})(\alpha - \bar{\alpha})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S - \bar{S})^2 \sum_{i=1}^n (\alpha - \bar{\alpha})^2}}. \quad (12)$$

В работе исследованы методы формирования габаритов энергетической установки, выбор кранового, водолазного оборудования и аппаратных средств для использования на судах обеспечения подводно-технических работ. Выбор и систематизацию указанного оборудования, предполагаемого к установке на перспективных судах обеспечения подводно-технических работ, предлагается производить с использованием базы данных близких по назначению судов.

Заключение

В работе на основе использования существующего опыта проектирования составлена формула, позволяющая в первом приближении оценить размеры энергетической установки, грузоподъемных устройств и водолазного оборудования, планируемых к установке на проектируемое судно, обеспечивающее обслуживание подводных аппаратов любого типа. Полученные результаты предполагается использовать в дальнейшем при формировании алгоритма проектирования судов, предназначенных для проведения подводно-технических работ, обеспечивающих обслуживание подводных аппаратов любого типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. Протасов Е. В. Телеуправляемые аппараты для подводно-технических работ / Е. В. Протасов // Деловой журнал Neftegaz.RU. — 2019. — № 8 (92). — С. 16–19.
2. Войтов Д. В. Телеуправляемые необитаемые подводные аппараты / Д. В. Войтов. — М.: МОРКНИГА, 2012. — 504 с.

3. Войтов Д. В. Автономные необитаемые подводные аппараты / Д. В. Войтов. — М.: МОРКНИГА, 2015. — 332 с.
4. Войтов Д. В. Подводные обитаемые аппараты / Д. В. Войтов. — М.: ООО «Издательство Астрель», 2002. — 303 с.
5. Смирнов К. А. Мобильный пост управления подводно-техническими работами / К. А. Смирнов, А. Д. Измайлов, Р. А. Андреюк, Д. С. Бабкин // Морской вестник. — 2020. — № 4 (76). — С. 107–109.
6. Новиков А. И. Организация подводно-технических работ на объектах добычи ПАО «ГАЗПРОМ» / А. И. Новиков, Е. М. Подоляко, А. Б. Сувалов // Газовая промышленность. — 2020. — № S2 (802). — С. 28–30.
7. Цемкало М. Л. Опыт выполнения подводно-технических работ силами ООО «Газпром флот» / М. Л. Цемкало, Д. В. Шулепов, О. С. Чириков // Газовая промышленность. — 2020. — № S2 (802). — С. 100–103.
8. Гайкович А. И. Проблемы теории проектирования судов и ее преподавания / А. И. Гайкович // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2020. — № S1. — С. 137–141. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-1-S-I-137-141.
9. Igrac B. An interactive layout exploration and optimisation method for early stage ship design / B. Igrac, R. Pawling, A. Sobey, J. Rigby, G. Thomas // Proceedings of the International Conference on Computer Applications in Shipbuilding 2019, 24–26 September 2019, Rotterdam, the Netherlands. — The Royal Institution of Naval Architects, 2019.
10. Лебедева М. П. Управляемость и моделирование движения водоизмещающего судна / М. П. Лебедева, А. О. Лебедев. — Вологда: Инфра-инженерия, 2023. — 200 с.

REFERENCES

1. Protasov, E. V. “Teleupravlyaemye apparaty dlya podvodno-tekhnicheskikh rabot.” *Delovoi zhurnal Neft-egez.RU* 8(92) (2019): 16–19.
2. Voitov, D. V. *Teleupravlyaemye neobitaemye podvodnye apparaty*. M.: MORKNIGA, 2012.
3. Voitov, D. V. *Avtonomnye neobitaemye podvodnye apparaty*. M.: MORKNIGA, 2015.
4. Voitov, D. V. *Podvodnye obitaemye apparaty*. M.: ООО «Izdatel'stvo Astrel'», 2002.
5. Smirnov, K. A., A. D. Izmailov, R. A. Andreyuk, and D. S. Babkin. “Mobil'nyi post upravleniya podvodno-tekhnicheskimi rabotami.” *Morskoi vestnik* 4(76) (2020): 107–109.
6. Novikov, A. I., E. M. Podolyako, and A. B. Suvalov. “Organizatsiya podvodno-tekhnicheskikh rabot na ob'ektakh dobychi PAO «GAZPROM».” *Gazovaya promyshlennost'* S2(802) (2020): 28–30.
7. Tsemkalo, M. L., D. V. Shulepov, and O. S. Chirikov. “Opyt vypolneniya podvodno-tekhnicheskikh rabot silami ООО «Gazprom flot».” *Gazovaya promyshlennost'* S2(802) (2020): 100–103.
8. Gaikovich, Alexander. “Ship design theory and its teaching.” *Transactions of the Krylov state research centre* S1 (2020): 137–141.
9. Igrac, B., R. Pawling, A. Sobey, J. Rigby, and G. Thomas. “An interactive layout exploration and optimisation method for early stage ship design.” *Proceedings of the International Conference on Computer Applications in Shipbuilding*. The Royal Institution of Naval Architects, 2019.
10. Lebedeva, M. P., and A. O. Lebedev. *Upravlyaemost' i modelirovanie dvizheniya vodoizmeshchayushchego sudna*. Vologda: Infra-inzheneriya, 2023.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Абдуллаев Ойрад Мамедрагим оглы —
директор
Каспийский Морской Транспортный
Проектно-Изыскательный
и Научно-Исследовательский Институт
(КАСПМОРИИПРОЕКТ)
AZ1003, Азербайджан, Баку, ул. Зия Юсифзаде, 48
e-mail: oyrad.abdullayev@asco.az

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Abdullayev, Oyrad Mamedragim —
CEO
Design-Research
and Scientific-Investigation Institute
of Caspian Sea Transport
48 Ziya Yusifzade Str.,
Baku, AZ1003, Azerbaijan
e-mail: oyrad.abdullayev@asco.az

Статья поступила в редакцию 9 мая 2023 г.

Received: May 9, 2023.

DETERMINING THE AREA OF A TECHNICAL SYSTEM STABILITY IN FUZZY SETS TERMS

M. Yu. Yastrebov, P. V. Komissarov, S. V. Kolesnichenko

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

Ensuring the stability of the technical systems functioning, including those in water transport, is an important area for the application of mathematical methods, including probabilistic and mathematical-statistical methods. The stochastic nature of disturbances affecting complex systems and worsening the level of stability of the latter should be reflected in the implemented human-machine control loops. One of the directions here is the accounting and use of (usually competing) expert assessments, on the one hand, and a reasonable definition of stability indicators, a choice from a variety of possibilities, on the other hand. From a general point of view of management theory, the method of using expert assessments developed in the paper can be considered as an integral part of the risk management problem that is being developed so far, mainly for economic systems and using only financial criteria. The concept of the minimum allowable efficiency of a technical system is introduced in the paper. On its basis, an approach in which the indicator of the stability of a technical system is linked to a system-wide criterion indicator of the quality of its functioning is implemented. The corresponding mathematical model as a problem of mathematical programming is formulated. Approaches to its solution including for the nonconvex multiextremal case are discussed. A feature of the proposed approach to the definition of the integral indicator of the stability of the dynamics of a technical system is the use of expert assessments in determining the probable range of changes in the controlled variables of the optimization model, implemented as a mathematical programming problem, which logically leads to the use of fuzzy set theory. With the non-linearity of the objective functions and restrictions that arise in this case, the gradient method of searching for a conditional optimum is effective.

Keywords: fuzzy sets, optimizing, expert analysis, area of stability, mathematical programming.

For citation:

Yastrebov, Mikhail Yu., Peter V. Komissarov, and Sergey V. Kolesnichenko. "Determining the area of a technical system stability in fuzzy sets terms." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 692–700. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-692-700.

УДК 519.245

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ СТАБИЛЬНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В ТЕРМИНАХ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

М. Ю. Ястребов, П. В. Комиссаров, С. В. Колесниченко

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

Объектом исследования в работе является вопрос обеспечения стабильности функционирования технических систем, в том числе на водном транспорте как важная область приложения математических методов, включая теоретико-вероятностные и математико-статистические. Отмечается, что стохастическая природа возмущений, воздействующих на сложные системы и ухудшающих уровень стабильности последних, должна быть отражена в реализуемых человеко-машинных контурах управления. Одним из направлений здесь является учет и использование (как правило, конкурирующих) экспертных оценок, с одной стороны, и обоснованная дефиниция показателей стабильности, выбор из разнообразия возможностей — с другой. С общей точки зрения теории управления развиваемая в работе методика использования экспертных оценок может рассматриваться как составная часть проблемы управления рисками, развиваемой до настоящего времени в основном для экономических систем и при использовании лишь финансовых критериев. В данной работе вводится понятие «минимально допустимая эффективность технической системы». На его основе реализуется подход, в котором показатель стабильности технической системы увязывается с общесистемным критериальным показателем качества ее функционирования.

Соответствующая математическая модель формулируется как задача математического программирования. Рассматриваются подходы к ее решению, в том числе для невыпуклого многоэкстремального случая. Особенностью предлагаемого подхода к дефиниции интегрального показателя стабильности динамики технической системы является использование экспертных оценок при определении вероятного диапазона изменения управляемых переменных оптимизационной модели, реализуемой как задача математического программирования, что логически приводит к использованию теории нечетких множеств. Отмечается, что при нелинейности возникающих в данном случае целевых функций и ограничений эффективным является градиентный метод поиска условного оптимума.

Ключевые слова: нечеткие множества, оптимизация, экспертные оценки, область стабильности, математическое программирование, градиентный метод.

Для цитирования:

Ястребов М. Ю. Определение области стабильности технической системы в терминах нечетких множеств / М. Ю. Ястребов, П. В. Комиссаров, С. В. Колесниченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 692–700. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-692-700.

Введение (Introduction)

Транспортные системы как сложные технические устройства подвержены многочисленным рискам, снижающим стабильность их функционирования. Последние, в свою очередь, обусловлены различными погодно-климатическими факторами, оказывающими влияние на движение судов по морским и внутренним водным путям, а также отказами в работе судового оборудования, береговых механизмов и гидротехнических сооружений. Для части рисков (при наличии однородного статистического материала) оценка вероятности их проявления может быть выполнена с использованием частотного метода.

Во многих случаях соответствующие выборки количественных значений факторов оказываются либо короткими, либо неоднородными, т. е. относящимися к разным регионам и разным типам судовых двигателей. В данном случае может быть использован альтернативный подход с применением экспертных оценок вероятностей проявления факторов риска. При этом возникает проблема согласования конкурирующих оценок, исходящих от различных привлеченных экспертов, и получения обобщающей интегральной оценки факторов с недостаточной стохастичностью (отсутствием установленного факта устойчивости относительных частот), не получившая к настоящему времени исчерпывающего решения. Другим аспектом общей задачи учета и анализа рисков снижения качества функционирования системы является формальная дефиниция показателя стабильности и его использование в рамках математических моделей оптимизационного характера.

Управление рисками для поддержания стабильности системы предполагает, в соответствии с положениями ISO, в том числе и количественную, т. е. *вероятностную*, оценку выявленных рисков¹. В статье [1] предложена концептуальная трактовка термина «риск» применительно к специфике речного транспорта как вероятность неблагоприятных последствий принятого управленческого решения (представляется, что это определение можно распространить также на последствия проявления факторов риска, которые не зависят от управленческих решений, т. е. от влияния «среды», внешней по отношению к рассматриваемой транспортной системе). Существенным является и то, что там же для формализации оценки проявления риска предлагается использование «знаний и опыта людей», т. е. экспертных оценок. Таким образом, «риск как вероятность» открывает концептуальное поле для математических аспектов решения задачи риск-менеджмента.

Целью настоящего исследования является разработка возможного подхода к совмещению экспертных, в том числе качественных оценок и формализованных математических моделей.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В ряде научных публикаций обсуждается построение математических моделей учета рисков (которые, впрочем, не носят оптимизационного характера). Так, в исследовании [2] предлагаются

¹ ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011. Менеджмент риска. Методы оценки риска. М.: Стандартинформ, 2012. 70 с.

в качестве методологической основы построения IT-платформы удаленного мониторинга техногенных систем, в том числе на речном и морском транспорте, а также для портовых грузоподъемных механизмов формирование матрицы оценок технического состояния слабоструктурированного множества лингвистических (по-видимому, экспертных) критериев. В работе [3] приводится вариант классификации рисков по ряду показателей в основном экономической, а не техногенной природы применительно к решению задач бухгалтерского учета. В работе [4] в основу риск-менеджмента заложено построение матрицы оценивания рисков. При этом следует отметить, что использование данного подхода, с одной стороны, с учетом качественного характера оценок в матрице априорно фиксированного размера (например, 4×4), задающей качественную, а не вероятностную градацию рисков, затрудняет построение математических моделей, но с другой стороны, может служить отправной точкой в использовании методологии нечетких множеств (например, [5], [6]). Исследование этого вопроса является темой данной статьи. С этим согласуется указание в работе [7] на результативность совмещения расчетов и экспертного оценивания вероятностей аварий на гидротехнических сооружениях в рамках сценарного подхода. В русле такого подхода в статье [8] также предлагается включение экспертных оценок в двумерное множество показателей мера неопределенности / риск.

В обзорной публикации [9] также исследованы варианты классификации транспортных рисков, принятые в зарубежных транспортных компаниях на основе матрицы рисков. Что касается минимизации рисков с учетом затрачиваемых ресурсов, то автор указанной ранее работы ограничивается замечанием о важности «грамотных проектных решений». В публикации [10], имеющей, в некоторой степени декларативный характер, в части обсуждения вероятностных аспектов риск-менеджмента на транспорте тема ограничивается общепринятой дефиницией «риск есть влияние неопределенности на цели», а также отмечается важность использования экспертных оценок в ситуациях коротких выборов: *«...чем прочнее изделие, тем труднее становится статистическая проверка гарантированного уровня надежности»* [10, с. 152].

В целом можно сделать вывод о том, что в исследованиях по управлению рисками на водном транспорте до последнего времени преобладали финансово-экономические подходы, а объектами управления выступали экономические показатели и факторы риска. При этом следует отметить, что в некоторых публикациях количественное оценивание рисков, возникающих при функционировании транспортных систем (в том числе авиационных и железнодорожных), и управление этими рисками рассматривается в концепции математического моделирования. Так, в работах [12], [13] для оценивания в транспортных системах рисков, последовательно проявляемых в цепочке причин и следствий, строится дискретная модель цепей случайных событий.

Начиная с 2013 г. в научной школе ГУМРФ по тематике управления рисками на водном транспорте появился ряд публикаций, связанных с применением математического моделирования и IT-технологий к задачам анализа и минимизации рисков. Так, в работе [14] обсуждается возможный метод построения диагностических систем идентификации рисков в контуре автоматизированного управления на основе выборочного анализа данных. Статья [15] посвящена алгоритмизации и на этой основе программированию соответствующего функционального модуля для управления рисками при проведении дноуглубительных работ. При построении матрицы рисков оценок авторами публикации последовательно применяются экспертные оценки, что является предметом рассмотрения и настоящей статьи. Методологической основой отыскания экстремальной (критической) цепочки последовательных реализаций риск-факторов выбрана теория ациклических графов. Схожий методологический подход представлен в работах [11] и [16], где строится математическая модель задачи определения критической (по средней величине ожидаемых потерь) цепочки потенциально реализуемых рисков.

В целом на основе анализа отраслевых и общенаучных публикаций можно сделать вывод о том, что проблема риск-менеджмента в системах водного транспорта все еще недостаточно изучена. В первую очередь это касается методов, основанных на применении математического моделирования, в том числе оптимизационного математического программирования.

Пусть k — оптимизируемый показатель качества функционирования технической системы (например, техническая надежность либо (в экономической интерпретации) объем однородной продукции, прибыль и т. п.), $X = (x_1, \dots, x_n)$ — набор независимых статистически влияющих на k факторов, целевая функция являющаяся уравнением множественной регрессии (например, линейной или квадратичной):

$$k = f(X). \quad (1)$$

Далее $\delta_i = [a_i, b_i]$ — отрезок, на котором функция Φ_i распределения значений фактора x_i принимает ненулевые значения, либо δ_i — априорно (экспертно) назначаемый отрезок. При этом имеем ограничение

$$x_i \in \delta_i. \quad (2)$$

На практике в первом случае, естественно, следует исходить либо из нормального распределения и задания интервала δ_i по правилу «трех сигм», либо из эмпирической функции распределения, полученной по выборке соответствующего фактора. Декартово произведение $\Phi = \prod_{i=1}^n \delta_i$ — исходное фазовое пространство факторов, $K = f(\Phi) \subset R$ — множество значений оптимизируемого показателя.

Введем понятие *порогового среза отрезка* δ_i , задаваемого в виде ${}_{\pi}\delta_i = \{x_i / P(x_i \in \delta_i) \geq \pi\}$, где $\pi \in (0, 1)$ — назначаемое экспертным путем (варьируемое в ходе машинного эксперимента) пороговое значение вероятности. Декартово произведение ${}_{\pi}\Phi = \prod_{i=1}^n {}_{\pi}\delta_i$ — соответствующий пороговый срез фазового пространства.

Задачу математического программирования:

$$f(x_1, \dots, x_n) \rightarrow \max, \quad (3)$$

при ограничениях вида

$$x_i \in {}_{\pi}\delta_i \quad (4)$$

назовем *нечеткой оптимизационной моделью*, чтобы отделить ее от ситуации четкой оптимизации, когда ограничения имеют вид $x_i \in \delta_i$.

В дальнейшем для определенности будем рассматривать оптимизацию системного показателя k как его максимизацию, а целевую функцию f предполагать выпуклой вверх. Тогда максимум ее значений достигается во внутренней точке выпуклого множества ${}_{\pi}\Phi$ так, что как поиск оптимума, так и анализ модели можно выполнять градиентным методом.

По аналогии с понятием точки безубыточности в теории экономики предприятия [3], [4], когда последнее функционирует с нулевой прибылью, назовем точкой минимально допустимой эффективности (МДЭ) технической системы по критерию (1) значение $k_{\min}^e \in K$ — минимально допустимое (по технологическим условиям или требованиям внешней среды) значение критерия k . В рассматриваемой экономической ситуации и в исследуемом случае оптимизации по техническому критерию рассматриваемая изолированно точка МДЭ, как и точка безубыточности, является недостаточно информативной для принятия управляющих решений, поскольку значение $k_{\min}^e$ может достигаться в различных точках фазового пространства ${}_{\pi}\Phi$. Пусть $\Phi_{\min}^e = f^{-1}(k_{\min}^e)$ — аналог точки МДЭ.

Естественно считать целевую функцию f непрерывной по каждому аргументу, так что $\Phi_{\min}^e$ — декартово произведение отрезков, как и его пересечение с ${}_{\pi}\Phi$, которое обозначим через ${}_{\pi}A$ и назовем *областью сильной неустойчивости*:

$${}_{\pi}A = {}_{\pi}\Phi \cap \Phi_{\min}^e = \prod_{i=1}^n {}_{\pi}\alpha_i,$$

где ${}_{\pi}\alpha_i$ — соответствующие отрезки.

При непрерывном изменении точки X внутри множества ${}_{\pi}A$ либо вблизи него, т. е. «на пределе», траектория системы в пространстве $K \times {}_{\pi}\Phi$ соответствует заведомо неприемлемому риску

нестабильного поведения, поэтому в ограничениях оптимизационной задачи следует изолировать-ся от области ${}_{\pi}A$ в фазовом пространстве множеством ненулевой меры. Пусть $\lambda > 1$ — назначаемый экспертным путем (варьируемый при анализе модели) ограничитель риска.

Для реализации подхода совмещения концепции нечетких множеств [5], [6] и концепции экспертных оценок введем в рассмотрение множество

$${}_{\pi, \lambda}S = \{X / f(X) \geq \lambda f(k_{\min}^e), X \in {}_{\pi}\Phi\},$$

которое назовем *областью стабильности с сигнатурой* (π, λ) по критериальному показателю. В свою очередь, множество

$${}_{\pi, \lambda}B = \{X / f(X) < \lambda f(k_{\min}^e), X \in {}_{\pi}\Phi\} = {}_{\pi}\Phi / {}_{\pi, \lambda}S$$

естественно назвать *барьером неустойчивости*.

Поскольку в общем случае точка $X^{(0)} = (x_1^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$ глобального оптимума критерия f на всем пространстве Φ может отличаться от точек оптимума, достигаемых в области стабильности ${}_{\pi, \lambda}S$ с различными сигнатурами, назовем *точкой нечеткого оптимума* для соответствующей сигнатуры решение ${}_{\pi\lambda}X^{(0)} = ({}_{\pi\lambda}x_1^{(0)}, \dots, {}_{\pi\lambda}x_n^{(0)})$ задачи (3) с ограничениями вида

$$X \in {}_{\pi\lambda}S. \quad (5)$$

Тогда ${}_{\pi\lambda}k^{(0)} = f({}_{\pi\lambda}X^{(0)})$ — соответствующий оптимум.

Параметр λ назовем *рангом области стабильности*, а параметр π — *ее вероятностью*. Увеличивая при фиксированном π значение λ (уводя критерий от глобального оптимума, имеющего место при $\lambda = 1$, а систему — от области сильной неустойчивости), рассмотрим различные равновероятные сужающиеся нечеткие допустимые области ограничений (области стабильности ${}_{\pi, \lambda}S$), которым приписывается вероятность π , и получим соответствующий нечеткий оптимум ${}_{\pi\lambda}X^{(0)}$. В свою очередь, уменьшая при фиксированном λ значение π (уводя критерий от оптимума, имеющего место при $\lambda = 1$), как и при уменьшении λ , расширяем нечеткую область стабильности ${}_{\pi\lambda}S$.

В стандартном случае [3] экспертные оценки задаются в виде упорядоченного кортежа вероятностей, например, тройки значений: $0 < \pi_1 < \pi_2 < \pi_3 < 1$; при назначении π_1 должна учитываться малая информативность меньших значений вероятности, а при назначении π_3 — стохастическая в целом природа функционирования технической системы.

Пусть для трех значений вероятности: π_1, π_2, π_3 , и для трех значений ранга стабильности: $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, принятых в качестве типичных, найдены соответствующие решения задачи (3), (5). Для осуществления традиционного при использовании экспертных оценок минимаксного подхода (как, например, в [2]) и соответствующей нечеткой оптимизации сравним $\min_{\lambda}(\max_{\pi} f({}_{\pi\lambda}k^{(0)})) = k_{ia}$ и $\max_{\lambda}(\min_{\pi} f({}_{\pi\lambda}k^{(0)})) = k_{ai}$.

В идеальном случае совпадения минимакса и максимина итоговая экспертная оценка области стабильности S определяется сигнатурой (π_u, λ_v) , на которой они достигаются:

$$S = {}_{\pi_u \lambda_v}S.$$

В ситуации несовпадения этих экстремумов, достигаемых для параметров (π', λ') и (π'', λ'') , соответственно, полагаем

$$S = {}_{\pi' \lambda'}S \cap {}_{\pi'' \lambda''}S.$$

В случае, когда определение области стабильности является долгосрочным прогнозом, априори возможны ситуации, когда исходные области изменения допустимых значений факторов δ_i у различных экспертов могут оказаться несовпадающими и даже иногда непересекающимися. Формализуя эту ситуацию для m экспертных оценок, имеем при каждом $l = 1, \dots, m$ соответствующий набор $\{\delta_i^{(l)}\}$. Применение для каждого из них изложенной ранее процедуры определения области стабильности для тех же сигнатур (π_u, λ_v) дает m наборов нечетких областей стабильности $\{{}_{\pi_u \lambda_v}S^{(l)}\}$ и определяемых ими нечетких оптимумов ${}_{\pi\lambda}k_i^{(0)}$.

Следует отметить, что не исключен случай, когда при некоторых l_1 и l_2 соответствующие исходные фазовые пространства Φ^{l_1} и Φ^{l_2} , полученные по схеме $\Phi^{(l)} = \prod_{i=1}^n \delta_i^{(l)}$, не пересекаются. Тогда пустым оказывается также полное пересечение по всем экспертным оценкам:

$$\tilde{\Phi} = \bigcap_{l=1}^m \Phi^{(l)}. \quad (8)$$

Рассмотрим вначале случай, когда $\tilde{\Phi}$ не пусто. Тогда применение описанной процедуры, но при этом использующей в качестве исходного фазового пространства $\tilde{\Phi}$ вместо прежнего Φ , приводит к прогнозу области стабильности $\tilde{S}$ по формулам (6), (7). Имеющее при этом место сужение области стабильности, обусловленное переходом к пересечению (8), представляется закономерным, поскольку прежние вероятности π_1, π_2, π_3 используются теперь для удаленного по горизонту прогноза.

Затем перейдем к случаю, когда пересечение (8) пусто. Рассматривая поочередно фазовые пространства Φ^l в качестве прежнего Φ и применяя схему (6), (7), получим описание прогнозной ситуации в виде матрицы

$$\left(\pi_{i\lambda_1} k_{ia}^{(1)}, \pi_{i\lambda_1} k_{ai}^{(1)}, \pi_{i\lambda_2} k_{ia}^{(2)}, \dots, \pi_{i\lambda_3} k_{ia}^{(3)} \right)$$

размера $m \times 18$ и набора m нечетких областей стабильности $_{\pi\lambda} S^{(l)}$, возможно непересекающихся при некоторых парах значений параметра l .

Для фиксированной сигнатуры (π_u, λ_v) в качестве прогноза области стабильности выберем максимальный по значению t набор областей с непустым общим пересечением:

$$_{\pi_u \lambda_v} S = _{\pi_u \lambda_v} S^{(l_1)} \cap _{\pi_u \lambda_v} S^{(l_2)} \cap \dots \cap _{\pi_u \lambda_v} S^{(l_t)}.$$

Если максимальное значение t достигается на нескольких наборах, не совпадающих хотя бы по одному из пересекаемых множеств, то представляется целесообразным выбрать пересечение, минимальное по объему. От обобщающего прогноза, усредненного по всем l, π, λ , в данном случае целесообразно отказаться ввиду его неопределенности.

Следует отметить, что предложенное здесь ранжирование нечетких множеств на основе (π, λ) -сигнатур может рассматриваться как возможная альтернатива (либо новое концептуальное дополнение) сформулированной в работе [1] фазовой дифференциации, различающей область неустойчивости и области неуверенной, удовлетворительной, устойчивой и полной стабильности.

Рассмотрим теперь задачу определения подходящей траектории динамики системы — траектории, сопрягающей движение к оптимуму и сохранение по возможности желательного уровня стабильности. Для критерия f при определенных его характеристиках в общем случае возможно попадание глобально оптимального набора факторов X на границу допустимой области (например, точки максимума для выпуклой вниз функции).

Пусть $X^{(1)} = (x_1^{(1)}, \dots, x_n^{(1)})$ — текущее состояние системы, лежащее в области стабильности S . Будем исходить из определенного шага по времени и полагать, что в следующий контрольный момент систему можно перевести в состояние, более близкое к оптимуму, либо не допустить снижение ее стабильности. При этом следует исходить из того, что любую реальную производственно-техническую систему невозможно одномоментно перевести в состояние оптимума, поскольку любая математическая модель неизбежно абстрагируется от многих привходящих обстоятельств, далеко не всегда допускающих количественное выражение.

Поскольку в малой окрестности точки $X^{(1)}$ направление максимальной скорости роста критерия f задается градиентом $grad^{(1)} = \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}(X^{(1)}) \right)$ (в данном случае исходим из максимизации критерия), шагом h будем последовательно сдвигаться вдоль луча с направляющим вектором $grad^{(1)}$, исходящего из точки $X^{(1)}$: $X' = X^{(1)} + h \cdot grad^{(1)}$.

Если $f(X') \leq f(X^{(1)})$, то следуя бинарной стратегии, полагаем $h := h/2$ и заново вычисляем X' , закликая процесс. Если $f(X') > f(X^{(1)})$, то $X' := X' + h \cdot \text{grad}^{(1)}$ вплоть до получения точки X' , для которой $f(X') \leq f(X^{(1)})$. Теперь $X^{(2)}$ полагаем равным итоговой точке X' . Если окажется, что $X^{(2)} \notin S$, то значение шага h , при котором получена точка $X^{(2)}$, уменьшаем вдвое и повторяем всю процедуру заново. Ввиду выпуклости области S процесс заканчивается за конечное число шагов.

Следует отметить, что при отказе от предположения выпуклости критерия f последний может в общем случае быть многоэкстремальным, тогда описанная процедура соответствует приближению к локальному экстремуму. В данной ситуации целесообразно предварительно провести исследование на многоэкстремальность, вычисляя f на достаточно густой сетке точек, покрывающих выявленную область стабильности S .

Использование градиента для получения точки $X^{(2)}$ предполагает одновременное изменение каждого из факторов $x_i^{(1)}$ на соответствующую величину $\frac{\partial f}{\partial x_i} h$. Анализ модели может выполняться по отдельному фактору x_i с точки зрения его изолированного изменения при сохранении неизменными значений остальных факторов. В этом случае описанная ранее процедура применяется с использованием $\left(0, \dots, 0, \frac{\partial f}{\partial x_i}(X^{(1)}), 0, \dots, 0\right)$ в качестве направляющего вектора вместо градиента.

Следует отметить, что все ранее изложенное может, разумеется, применяться для отдельной сигнатуры (π_u, λ_v) и, соответственно, с заменой области стабильности S на $\pi_u \lambda_v S$.

Результаты исследования и их обсуждение (Research results and their discussion)

В результате исследования, проведенного для задачи управления риск-факторами нарушения стабильности функционирования технической воднотранспортной системы (строительно-восстановительные работы на водных путях, навигационная безопасность, диагностика силовых установок и т. д.), предложена концепция, основанная на формулировании оптимизационной задачи математического программирования, совмещаемой с экспертными прогнозными оценками для диапазонов изменения управляемых переменных. В рамках этой концепции даны формализованные определения:

- порогового среза фазового пространства риск-факторов;
- точки минимально допустимой эффективности;
- сигнатуры, совмещающей вероятность экспертных оценок с показателем стабильности как меры близости точек области к точке глобального оптимума;
- нечеткого оптимума;
- нечеткой области стабильности как подмножества фазового пространства.

Предложен метод управления на основе градиентного подхода, переводящий пошагово систему в состояние с улучшенным значением критериального показателя.

Заключение (Conclusion)

Для обеспечения стабильности технической системы в автоматизированном контуре управления необходимо совместное рассмотрение качественных и количественных вероятностных оценок потенциальных рисков, снижающих стабильность. При этом развитие на водном транспорте человеко-машинных контуров управления делает актуальной проблему совмещения неформализуемого опыта экспертов с оптимизационными моделями. В рамках этой концепции предложен подход, в котором экспертные оценки динамики факторов (управляемых переменных) и значение глобального оптимума критериального показателя стабильности совместно определяют область фазового пространства с минимально допустимым уровнем критерия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каретников В. В. К вопросу оценки рисков на внутреннем водном транспорте Российской Федерации / В. В. Каретников, К. И. Ефимов, А. А. Сикарев // Вестник Астраханского Государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2017. — № 2. — С. 22–27. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-2-22-27.
2. Панфилов А. В. Система адаптивного дистанционного мониторинга и контроля эксплуатации опасных объектов на основе риск-ориентированного подхода // А. В. Панфилов, О. А. Бахтеев, В. В. Дерюшев, А. А. Короткий // Безопасность техногенных и природных систем. — 2020. — № 2. — С. 19–29. DOI: 10.23947/2541-9129-2020-2-19-29.
3. Щепетова В. Н. О необходимости учета, анализа и оценки рисков в деятельности предприятий водного транспорта / В. Н. Щепетова, К. С. Шамонина // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2014. — № 41. — С. 74–80.
4. Шамонина К. С. Матрица рисков предприятий водного транспорта / К. С. Шамонина, В. Н. Щепетова // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2016. — № 48. — С. 197–202.
5. Броневиц А. Г. Нечеткие модели анализа данных и принятия решений / А. Г. Броневиц, А. Е. Лепский; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». — М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2022. — 264 с.
6. Рыбин В. В. Основы теории нечетких множеств и нечеткой логики / В. В. Рыбин. — М.: МАИ, 2007. — 96 с.
7. Пупышев Н. Н. Сценарный подход при оценке уровня безопасности СГТС / Н. Н. Пупышев // Наука и техника на речном транспорте. — 2003. — С. 44–48.
8. Белый О. В. Оценка безопасности транспортных систем на основе моделей рисков возникновения катастрофических событий / О. В. Белый, Ф. М. Кацман, Е. А. Куклев // Транспорт Российской Федерации. — 2005. — № 1 (1). — С. 62–63.
9. Латыпова Р. Р. Классификация и виды транспортных рисков / Р. Р. Латыпова // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. — 2016. — № 1 (52). — С. 71–76.
10. Рябинин И. А. Логико-вероятностный анализ проблем надежности, плавучести и безопасности / И. А. Рябинин. — СПб.: Политехника, 2009. — 600 с.
11. Куклев Е. А. Оценка рисков на основе цепей случайных событий / Е. А. Куклев // Наука и техника на транспорте. — М.: РАТИ, 2003.
12. Куклев Е. Л. Модели рисков катастроф как маловероятных событий в системах с дискретными состояниями / Е. Л. Куклев // Сб. трудов международной конференции «Системный анализ и моделирование». — СПб.: ЛЭТИ, 2003. — С. 74–79.
13. Куклев Е. А. Оценка безопасности эксплуатации аэрокосмических комплексов на основе рисков, определенных в нечетких множествах / Е. Л. Куклев // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2015». Международная научно-техническая конференция: материалы конф. — Казань: Издательство «Бриг», 2015. — С. 296–301.
14. Veselkov V. Development of Methods to Identify Risks to Build up the Automated Diagnosis Systems / V. Veselkov, N. Vikhrov, A. Nyrkov, S. Chernyi, I. Titov // 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). — IEEE, 2017. — Pp. 598–601. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910625.
15. Mamunts D. Models and algorithms for estimation and minimization of the risks associated with dredging / D. Mamunts, S. Sokolov, A. Nyrkov, S. Chernyi, M. Bukhurmetov, V. Kuznetsov // Transport and Telecommunication. — 2017. — Vol. 18. — Is. 2. — Pp. 139. DOI: 10.1515/tjt-2017-0013.
16. Нырков А. П. Модели, алгоритмы и программное обеспечение минимизации рисков мультимодальных перевозок / А. П. Нырков, А. А. Нырков // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 67–73.

REFERENCES

1. Karetnikov, Vladimir Vladimirovich, Konstantin Ivanovich Efimov, and Alexander Aleksandrovich Sikarev. "To the question of risk assessment on domestic water transport of the Russian Federation." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 2 (2017): 22–27.
2. Panfilov, A. V., O. A. Bakhteyev, V. V. Deryushev, and A. A. Korotkiy. "Adaptive remote monitoring and control system for the operation of hazardous facilities based on a risk-based approach." *Safety of Technogenic and Natural System* 2 (2020): 19–29.
3. Schepetova, V. N., and K. S. Shamonina. "About the necessity of accounting, analysis and evaluation of risks in activity of the enterprises of inland water transport." *Bulletin of VSAWT* 41 (2014): 74–80.

4. Shamonina, K. S., and V. N. Shepetova. "Internal water transport enterprises risk matrix." *Bulletin of VSAWT* 48 (2016): 197–202.
5. Bronevich, A. G., and A. E. Lepskii. *Nechetkie modeli analiza dannykh i prinyatiya reshenii*. M.: Izd. dom Vysshei shkoly ekonomiki, 2022.
6. Rybin, V. V. *Osnovy teorii nechetkikh mnozhestv i nechetkoi logiki*. M.: MAI, 2007.
7. Pupyshev, N. N. "Stsenarnyi podkhod pri otsenke urovnya bezopasnosti SGTS." *Nauka i tekhnika na rechnom transporte* (2003): 44–48.
8. Belyi, O. V., F. M. Katsman, and E. A. Kuklev. "Otsenka bezopasnosti transportnykh sistem na osnove modelei riskov vozniknoveniya katastroficheskikh sobytii." *Transport of the Russian Federation* 1(1) (2005): 62–63.
9. Latypova, Ramilya. "Classification and types of transport risks." *Newsletter of North-Caucasus Federal University* 1(52) (2016): 71–76.
10. Ryabinin, I. A. *Logiko-veroyatnostnyi analiz problem nadezhnosti, plavuchesti i bezopasnosti*. SPb.: Politehnika, 2009.
11. Kuklev, E. A. "Otsenivanie riskov na osnove tsepei sluchainykh sobytii." *Nauka i tekhnika na transporte*. M.: RATI, 2003.
12. Kuklev, E. L. "Modeli riskov katastrof kak maloveroyatnykh sobytii v sistemakh s diskretnymi sostoyaniyami." *Sb. trudov mezhdunarodnoi konferentsii «Sistemnyi analiz i modelirovanie»*. SPb.: LETI, 2003. 74–79.
13. Kuklev, E. "Simulation method for analysis of risk events and danger scenarios of crashes in aviation and cosmos systems." *Problemy i perspektivy razvitiya aviatsii, nazemnogo transporta i energetiki "ANTE-2015". Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya: Materialy konferentsii*. Kazan': Izdatel'stvo "Brig", 2015. 296–301.
14. Veselkov, Viacheslav, Nikolai Vikhrov, Anatolii Nyrkov, Sergei Chernyi, and Ivan Titov. "Development of methods to identify risks to build up the automated diagnosis systems." *2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus)*. IEEE, 2017. 598–601. DOI: 10.1109/EIconRus.2017.7910625.
15. Mamunts, D., S. Sokolov, A. Nyrkov, S. Chernyi, M. Bukhurmetov, and V. Kuznetsov. "Models and algorithms for estimation and minimization of the risks associated with dredging." *Transport and Telecommunication* 18.2 (2017): 139. DOI: 10.1515/ttj-2017–0013.
16. Nyrkov, A. P., and A. A. Nyrkov. "Models, algorithms and software for risks minimizing of multimodal transportations." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(20) (2013): 67–73.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ястребов Михаил Юрьевич —
кандидат экономических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: mikyast@gmail.com, kaf_math@gumrf.ru
Комиссаров Пётр Вениаминович — аспирант
Научный руководитель:
Колесниченко Сергей Викторович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: Komissarovp@yandex.ru
Колесниченко Сергей Викторович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_mathmod@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yastrebov, Mikhail Yu. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: mikyast@gmail.com, kaf_math@gumrf.ru
Komissarov, Peter V. — Postgraduate
Supervisor:
Kolesnichenko, Sergey V.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: Komissarovp@yandex.ru
Kolesnichenko, Sergey 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: kaf_mathmod@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 10 апреля 2023 г.
Received: April 10, 2023.

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-701-714

DEVELOPMENT OF THE COMPUTER PROGRAM FOR ANALYSIS STRUCTURAL INTEGRITY OF MARINE ENGINE ELEMENTS

E. V. Mazur, N. L. Velikanov, V. S. Mazur

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russian Federation

Timely implementation of maintenance processes provides confidence in maintaining performance and integrity throughout the life cycle of the system. Various developments in monitoring and analysis methods are aimed at maintaining the operability of systems by minimizing the failure rate. The developed computer program, presented in the paper, is used as one of the tools for assessing the technical condition of a ship power plant, allowing the use of an integrated approach to predicting and managing the quality of maintenance, including an assessment of the costs and timing of the implementation of repair work. When describing the creation of a computer program for assessing the structural integrity of ship engine elements, special attention is paid to the libraries used and the methods necessary for a comprehensive consideration of the "oil-engine" system. The Makava program, based on laboratory analyzes, allows you to determine the residual life of engine oil according to the actual state, by determining the parameters that mainly affect its aging, wherein setting threshold values for these parameters, forms the degree of deviation of actual values from the boundary values, predicting further wear of certain elements of the system. The program contains a database of typical changes in oil indicators regarding the occurrence of possible structural defects in the elements of the system, helps to expand the information resource by collecting, processing, accumulating and storing information on the degradation of the components of the propulsion complex of various engine models for subsequent planning of measures for the quality of maintenance and repair of shipboard power installations.

Keywords: process parameter matrix, motor oil, marine engine, oil analysis, computer program.

For citation:

Mazur, Ekaterina V., Nikolay L. Velikanov, and Valeriya S. Mazur. "Development of the computer program for analysis structural integrity of marine engine elements." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 701–714. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-701-714.

УДК 67.019

РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ ПРОГРАММЫ ДЛЯ АНАЛИЗА СТРУКТУРНОЙ ЦЕЛОСТНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СУДОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Е. В. Мазур, Н. Л. Великанов, В. С. Мазур

ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»,
Калининград, Российская Федерация

Своевременная реализация процессов технического обслуживания обеспечивает уверенность в сохранении производительности и целостности в течение жизненного цикла системы. Различные разработки методов контроля и анализа направлены на сохранение работоспособности систем сводя к минимуму частоту отказов. В статье представлена разработанная компьютерная программа, применяемая как один из инструментов для оценки технического состояния судовой энергетической установки, которая позволяет использовать интегрированный подход к прогнозированию и управлению качеством технического обслуживания, включая оценку затрат и сроков реализации ремонтных работ. При описании создания компьютерной программы для оценки структурной целостности элементов судового двигателя особое внимание уделяется использованным библиотекам и методам, необходимым для комплексного рассмотрения системы «масло – двигатель». Программа «Макава» позволяет на основе лабораторного анализа определить остаточный ресурс моторного масла по фактическому состоянию путем определения параметров, преимущественно оказывающих влияние на его старение, при этом устанавливая пороговые значения по данным параметрам, формирует степень отклонения фактических значений от граничных, прогнозируя в дальнейшем износ тех или иных элементов системы. Программа содержит базу данных типовых изменений показателей масла

относительно возникновения возможных конструктивных дефектов элементов системы, помогает расширить информационный ресурс посредством сбора, обработки, накопления и хранения информации о деградации компонентов пропульсивного комплекса различных моделей двигателей для последующего планирования мер по улучшению качества обслуживания и ремонта судовых энергетических установок.

Ключевые слова: матрица параметров процесса, моторное масло, судовой двигатель, анализы масел, компьютерная программа.

Для цитирования:

Мазур Е. В. Разработка компьютерной программы для анализа структурной целостности элементов судового двигателя / Е. В. Мазур, Н. Л. Великанов, В. С. Мазур // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 701–714. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-701-714.

Введение (Introduction)

Изменчивость, являющаяся неотъемлемой частью всех реальных систем, характеризуется как положительным значением: повышением эффективности работающих систем, так и отрицательным — износом, приводящим к снижению эффективности. Износ на ранних стадиях изменчивости не наносит урона производительности системы, но в долгосрочной перспективе неизбежно приводит к поломке механизма [1], [2]. Надежная работа энергетического оборудования на морских судах во многом зависит от поддержания в работоспособном состоянии используемых смазочных масел, а эффективность проведения действий по оперативному контролю состояния масляной системы снижает вероятность возникновения критической ситуации и уменьшает негативное воздействие, вызванное старением масла.

Система лабораторных исследований включает контроль показателей качества, влияющих на такие эксплуатационные характеристики, как антикоррозионные, антиокислительные, противозносные, пенообразующие, антифрикционные и вязкостные. Сочетание показателей и интенсивность их проявления определяют эффективную работу масла. Анализ образцов моторного масла предоставляет важную информацию, необходимую для раннего обнаружения неисправностей оборудования, отображая состояние работоспособности элементов и механизмов. Превышение частиц металла в составе указывает на повышенный износ механизмов, чрезмерное загрязнение масла неметаллическими компонентами свидетельствует о плохой защите циркуляционной системы от внешней среды.

Изменение физических и химических свойств масла приводит к нарушению его основных функций: обеспечению непрерывности масляной пленки на поверхностях относительно движущихся механизмов, предотвращая тем самым износ и трение, защите от коррозии и охлаждения рабочих элементов [3], [4]. Развитие подходов к улучшению эксплуатационных характеристик СЭУ, снижение затрат на техническое обслуживание, введение новых правил по защите окружающей среды требуют разработки и внедрения новых методов и средств результативного наблюдения состояния моторных масел с акцентом на повышении надежности [5], [6].

При контроле масляной системы судового двигателя с помощью лабораторных исследований в режиме эксплуатации возможно использование диагностических средств, таких как портативные мини-лаборатории экспресс-диагностики, способных в реальном времени оценить состояние масла. Широкое применение таких лабораторий сдерживается высокой стоимостью устройств, необходимостью доступности реагентов для проведения исследований масла, при этом не отменяя требований Российского морского регистра судоходства в части методических рекомендаций по обеспечению проведения анализов смазочного масла [7]. *Целью предлагаемого исследования* является разработка средства оперативного контроля моторного масла морского двигателя с применением метода, основанного на математической модели.

Инструментом для оценки состояния элементов СЭУ и последующим прогнозом остаточного ресурса масла является программное обеспечение, созданное на базе метода параметров процесса применяемого к лабораторным исследованиям отработанного масла [8]. Характеристикой, описы-

вающей свойства моторного масла и степень его деградации, являются оцениваемые параметры. Индекс эффективности оцениваемых параметров (ИЭФ) представляет собой линейную комбинацию выбранных ключевых показателей эффективности, определяющих нормальные значения элементов исследуемой структуры, помогая скорректировать временные интервалы технического обслуживания судового двигателя. Программа создана максимально гибкой, она позволяет определять и изменять исследуемый набор параметров, делая представленное приложение инструментом оптимизации для соблюдения определенных системных требований к остаточному ресурсу масляной системы судового двигателя.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Прогнозирование будущего и понимание происходящих явлений, основанное на наблюдении поведения последовательно полученных точек событий, сосредоточено на разработке моделей анализа временных рядов, описывающих поведение системы, способной к изменениям под влиянием внешних и / или внутренних событий. Обнаружение отклонений от нормы (смещение границ, выявление аномалий) во временных рядах в настоящее время представляет широкий интерес во многих областях науки и техники [9], [10]. Методы обнаружения изменений и анализ работы системы «масло – двигатель» разработаны таким образом, чтобы быть эффективными с точки зрения вычислений [11], [12].

Схематичная структура «Макава» приведена на рис. 1. При помощи представленного программного обеспечения появляется возможность на основе статистических данных анализов масла двигателя предсказать износ тех или иных элементов, тем самым скорректировав время и затраты на техническое обслуживание СЭУ и ее механизмов.

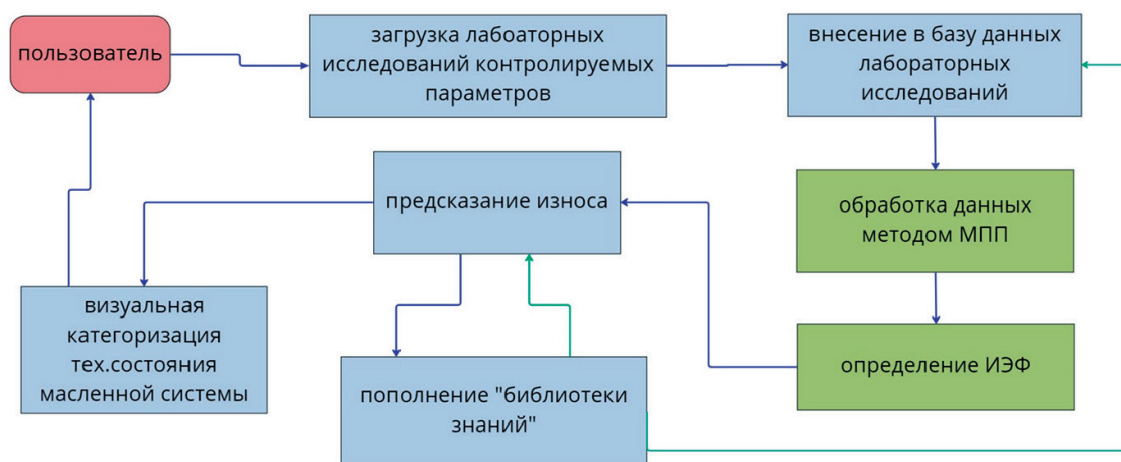


Рис. 1. Схема структуры компьютерного программного обеспечения «Макава»

При создании программы был использован формат базы данных SQLite3, который является одним из наиболее эффективных, расширяемых и простых в использовании систем управления пространственно-временными данными, он полностью автономен и не имеет внешних зависимостей [13]. Применение SQLite3 может оказать помощь в использовании новых алгоритмов и подходов при анализе лабораторной диагностики масла ввиду общедоступности результатов исследований. При создании базы данных были учтены основные требования к характеристикам библиотеки, так как обрабатываемые данные являются репрезентативными (поступающие в базу показания различаются по количеству элементов, являются разнообразными по фактическому содержанию (внешний вид и содержание различны у лабораторий, представляющих отчеты анализов), сложными (информация поступает из нескольких источников, используется несколько языков), доступными и регулярно дополняемыми [14]. Выбор системы управления базами данных выполнялся с учетом следующих возможностей SQLite3:

- последовательность операций автономна и изолирована;
- требование к настройке и администрированию отсутствует;
- хранение базы данных осуществляется в одном кроссплатформенном файле;
- простое в использовании API;
- использование большинства функций языка запросов.

Структура SQLite3 приведена на рис. 2.

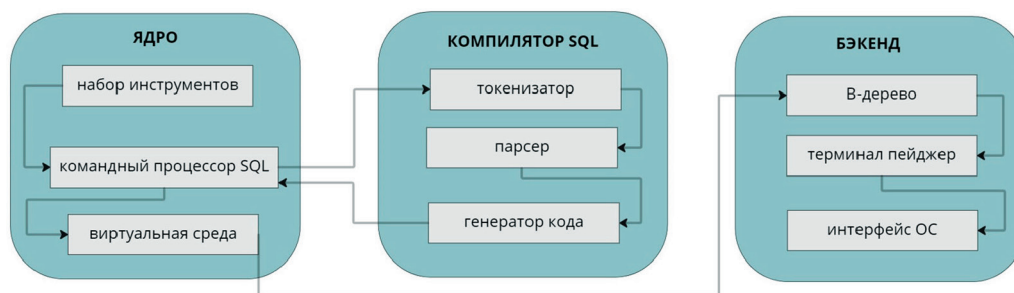


Рис. 2. Структура SQLite3

Применение представленной системы является очень удобным для конечного пользователя в связи с нулевой конфигурацией SQLite — механики должны просто выбрать файл для работы, в то время как разработчик имеет значительное количество параметров настройки. При установке программы на устройство с ограниченной операционной системой SQLite3 также имеет преимущество, так как простое использование ресурсов и небольшой объем кода приводят к минимизации поддержки со стороны хост-среды. Так, для того чтобы фактически подключиться к базе, добавить данные и в зависимости от запроса получить данные и отключиться требуется примерно восемь функций, при этом программный интерфейс SQLite3 в третьей версии имеет в своем распоряжении примерно 80 функций.

Система управления базами данных SQLite3 представляет интерфейс API языка C, что значительно упрощает работу с базой данных. При создании базы данных компьютерной программы «Макава» использовались базовые функции sqlite3. Создание БД и подключение к ней с помощью sqlite3 показано на рис. 3, а. После подключения к базе данных создаем таблицу, содержащую данные по часам наработки двигателя, и информацию по исследуемым параметрам отработанного масла (рис. 3, б).

а)

```
13 conn = sqlite3.connect('metering.db')
14 cur = conn.cursor()
15 conn.enable_load_extension(True)
16 conn.load_extension("./stats")
```

б)

```
51 def to_table():
52     tables = get_tables(file, get_pages(file))
53     cur.execute("""UPDATE sample_ref
54                 SET U_code = 1
55                 WHERE U_code = 0""")
56     conn.commit()
57     tables.to_sql('sample_ref', conn=conn, if_exists='append', index=False)
```

Рис. 3. Часть кода:

а — подключение к БД; б — добавление данных в БД

При разработке приложения были определены две части: первая часть — предварительная обработка для установления входных переменных (извлечение данных), вторая часть — процедура

фактических вычислений. Математические модели интегрированы в виде отдельных расширений. Все программирование было выполнено на языках sql и Python.

Основополагающее значение при извлечении информации имеет сбор данных с использованием современных технологий [15], [16]. Результаты анализов масла, как правило, поступают в службу старшего механика в виде pdf-документов. Данный формат, разработанный для хранения и структурирования данных, давно и широко используется во всем мире, позволяя легко обмениваться информацией. В этой связи неизбежно встает вопрос об обработке информации, представленной в формате pdf. В настоящее время существует ряд библиотек и пакетов Python, предоставляющих степень свободы для компиляции скриптов, одной из которых является PyPDF2.

Данная библиотека фиксирована на манипулировании документом путем разделения страниц, извлечения содержимого страница за страницей, объединения нескольких pdf-файлов и т. д. После сбора данных с документа в формате pdf проходит сериализации объектов при помощи библиотеки PyPDF2 и уже структурированная информация хранится в базе данных. Такой метод не только эффективен при быстром поиске с использованием ключа, но также показывает высокие результаты при работе с нелинейными структурами данных. Алгоритм извлечения данных в среде Python представлен на рис. 4.

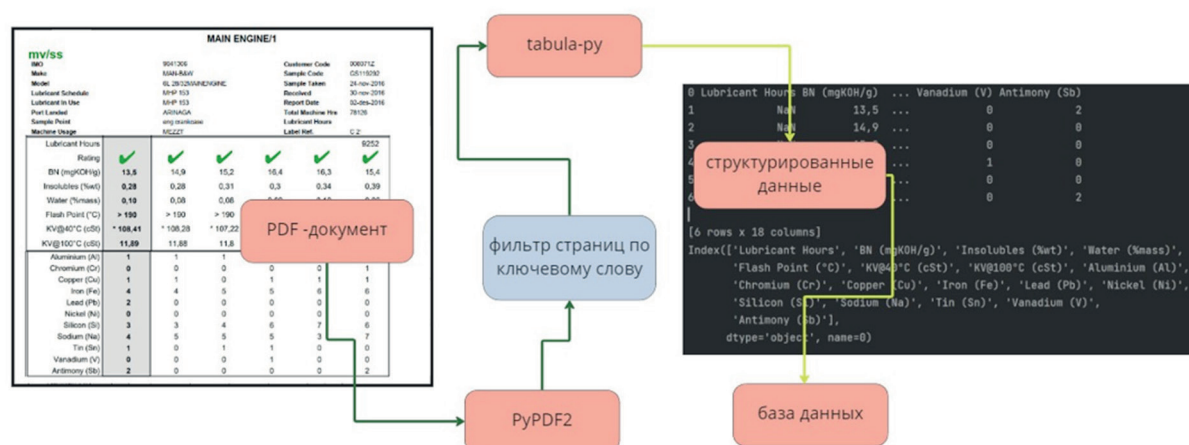


Рис. 4. Схема процесса извлечения данных

Представленная библиотека Python имеет ограничения в процессе извлечения данных из документов формата pdf. Так, например, PyPDF2 в некоторых случаях игнорирует пробелы, что ведет к выводу данных не в табличной форме, а в виде текста. В этой связи PyPDF2 была использована для поиска необходимой страницы по ключевому словосочетанию «main engine», вторая библиотека tabula-py — для чтения таблицы во избежание игнорирования пробелов.

Большой интерес со стороны программистов вызывает использование языка Python как средства для интеллектуального анализа данных. Благодаря открытому исходному коду и наличию множества инструментов общего назначения методы Python можно распределить исходя из поставленной задачи, будь то выполнение функции или соответствие приложению, в которых данные функции могут использоваться. Формирование запросов (инструкций), поиск, сортировка и структурирование необходимой информации среди множества при работе с базами данных отводится языку SQL, осуществляющему три основные функции: запрос к базе данных для отображения информации, необходимой для ответа на вопрос, сбор и хранение данных в табличном виде и контроль их безопасности [17]. Для манипулирования данными язык SQL наделен группой операторов DML имеющих четыре основные команды:

- проведение выборки данных;
- внесение новых данных;
- изменение существующих данных;
- удаление данных.

При разработке интеллектуальной программы «Макава» полученные в результате лабораторных исследований физико-химические показатели отработанного моторного масла проходят следующие этапы обработки:

1-й этап — сравнение полученных данных предельных уровней нормальных значений, согласно требованиям системы морского транспорта [18], и с учетом граничных значений, представленных лабораторией;

2-й этап — формирование верхней ($P_{в.к.}$) и нижней ($P_{н.к.}$) предельных границ и средних значений исследуемых параметров;

3-й этап — приведение количественных значений к безразмерным величинам;

4-й этап — составление матрицы параметров процесса (МПП) [19];

5-й этап — определение индекса эффективности каждого из параметров.

После извлечения данных из документов формата pdf и формирования таблицы осуществляется переход к этапу сопоставления полученной информации с нормальными значениями, которые могут быть либо предложены лабораторией в тех же обрабатываемых материалах (рис. 5), либо в виде перехода к информации по граничным значениям согласно «РД 31.2.07–2001. Топлива, масла, смазки и специальные жидкости для судов морского транспорта».

New Oil	Critical Val.	Analysis			
100.0	<75 or >220	Appearance	Dark	Dark	Dark
11.5	<9.2 or >17.5	KV@40°C[mm²/s]	106.6	106.1	107.2
		KV@100°C[mm²/s]	11.80	11.65	11.81
15	>0.5	Water[%wt]	0.10	0.05	0.10
230	<7.5	BN[mgKOH/g]	14.6	14.8	15.3
	<170	Flash Point	>200	>200	>200
	>1.5	Soot/Insoluble[%wt]	0.30	0.40	0.30
		PQ Index/2ml	<10	23	<10
Wear Elements [ppm]					
	>100*	Aluminium (Al)	<1	2	2
	>50*	Chromium (Cr)	1	<1	1
	>50*	Copper (Cu)	1	<1	<1
	>150*	Iron (Fe)	4	5	4
	>50*	Lead (Pb)	<1	1	<1
	>30*	Tin (Sn)	<1	<1	<1
Contaminant Elements [ppm]					
		Boron (B)	<1	<1	1
	>100*	Sodium (Na)	6	5	6
	>50*	Silicon (Si)	<1	<1	2
		Molybdenum (Mo)	<1	<1	<1
		Nickel (Ni)	1	<1	<1
		Silver (Ag)	<1	<1	<1
		Vanadium (V)	<1	<1	<1

Рис. 5. Результаты лабораторных испытаний масла

Представленные методы и алгоритмы обработки данных при создании программного обеспечения достаточно эффективны и просты в применении. Предложенные библиотеки совместимы с рядом других библиотек используемых в Python, что дает возможность добавления функций или усовершенствования программы.

Результаты (Results)

На первом этапе обработки, при сравнении полученных лабораторных данных с нормальными значениями, используются следующие функции (рис. 6):

- выражающая показания средних значений и среднеквадратичного отклонения (принимаются только те из них, которые попадают в диапазон нормальных значений, остальные не учитываются (1,0 — идентификаторы групп) — рис. 6, а (для новых (0) и старых (1) значений выбросы не учитываются);
- обнаружения выбросов во вновь поступивших данных (рис. 6, б);
- сравнения актуальных значений с предыдущими (рис. 6, в).

Обобщение выборки на совокупность несет в себе риски неточности, применение нулевой гипотезы дает возможность решить, когда выборку следует обобщать. Для проверки однородности двух случайных выборок и обнаружения сдвигов граничных пределов эффективным является использование статистического критерия Манна – Уитни. Критерий Стьюдента помогает определить значимость расхождения при определении средних величин анализируемых параметров. Если в выборке количество ранее поступивших значений больше или равно пятидесяти, то при сравнении используется распределение Стьюдента, менее пятидесяти — критерий Манна – Уитни и нулевая гипотеза, если новые значения не имеют отличия от ранее поступивших (применяется по умолчанию).

а)

```
73 def stats(column):
74     if column in data_norm_elements.keys():
75         value = data_norm_elements[column]
76         cur.execute("""SELECT AVG(column) AS column_ma,
77                         STDDEV_POP(column) AS column_stddev
78                         FROM (
79                         SELECT %s AS column, U_code FROM sample_ref
80                         WHERE column < %f) AS one
81                         GROUP BY U_code;
82                         """ % (column, value))
83         result = cur.fetchall()
```

б)

```
99 def release(column):
100     if column in data_norm_elements.keys():
101         value = data_norm_elements[column]
102         cur.execute("""SELECT %s as column FROM sample_ref
103                         WHERE column > %f and U_code = 0
104                         ;
105                         """ % (column, value))
106         result = cur.fetchall()
107
```

в)

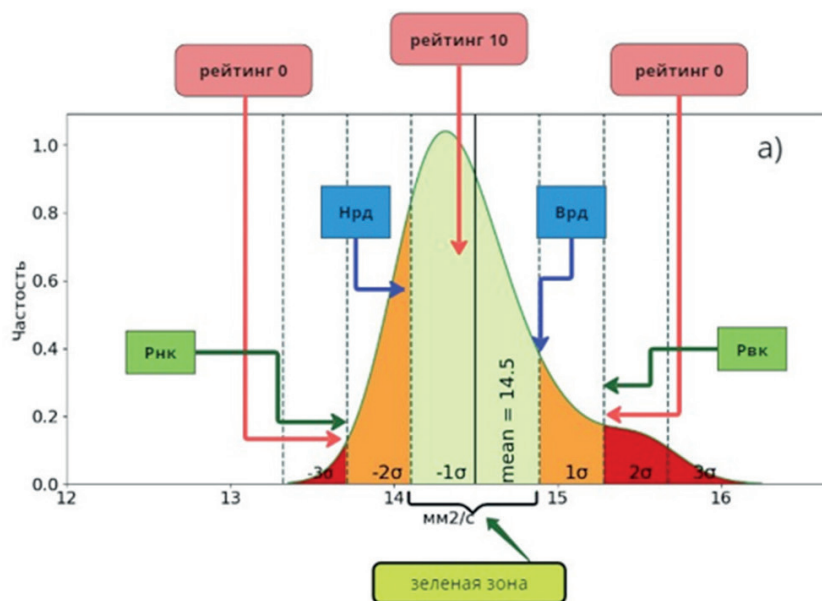
```
10 def compare(column):
11     if len(old_data) <= 50:
12         statistic, pvalue = stats.mannwhitneyu(old_data[column].dropna().tolist())
13     else:
14         statistic, pvalue = stats.ttest_ind(old_data[column].dropna().tolist(), n
15     if pvalue < 0.05:
16         print('Новые данные отличаются от старых данных')
17     else:
18         print('Новые данные не отличаются от старых данных')
```

Рис. 6. Функции, использованные при сравнении данных (часть кода):

- а — функция для нахождения среднего и стандартного отклонений;
- б — функция для обнаружения выбросов в новых (0) данных;
- в — функция для сравнения старых (1) и новых (0) данных

Второй этап математической обработки включает определение верхних и нижних предельных значений исследуемых элементов и обозначений зон продуктивности. Зона продуктивности, или «зеленая зона», — диапазон с наилучшей эффективностью работы параметра, ограниченный контрольными границами (рис. 7). Металлические включения и содержание золы, как правило, имеют один допустимый предел согласно физическому смыслу и в этой связи «зеленая зона» будет иметь односторонний допуск. Такие показатели как вязкость, щелочное число, температура вспышки будут иметь двусторонний допуск. Приближение значений к любой из границ является признаком понижения продуктивности.

а)



б)

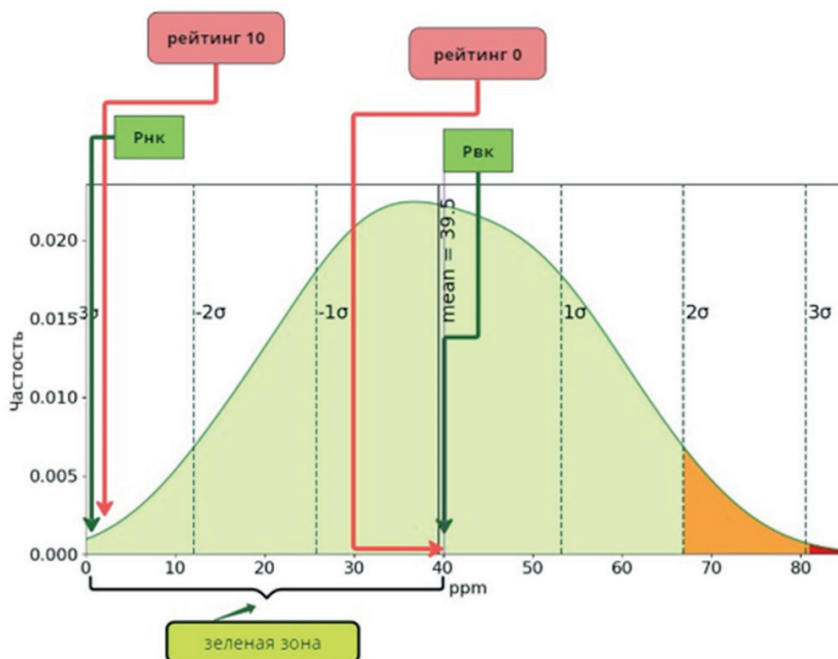


Рис. 7. Кривые распределения анализируемых данных с отмеченными контрольными границами и «зелеными зонами» показателей:
а — вязкости при 100 °С; б — никеля

Для последующей математической обработки необходимо перевести показания каждого исследуемого элемента ($\mathcal{E}_{ij}$) в лабораторных анализах к безразмерным единицам по шкале от 0 до 10. Для перевода используются следующие выражения:

$$\mathcal{E}_{ij} = 10 \frac{P_d - P_{в.к}}{P_{н.к} - P_{в.к}}; \quad (1)$$

$$\mathcal{E}_{ij} = 10 \frac{P_d - P_{н.к}}{P_{в.к} - P_{н.к}}, \quad (2)$$

где P_d — фактическое значение параметра.

Формула (1) применяется в случае, когда концентрация системной переменной более предпочтительна в области нижней контрольной границы ($P_{н.к}$). Данное выражение используется при расчете таких параметров, как, например, содержание воды, металлов, общее кислотное число (TAN). Наивысший балл «10» будет присваиваться в этом случае на нижней границе «зеленой зоны».

Формула (2) применима при благоприятной фиксации параметра в районе верхней контрольной границы ($P_{в.к}$). Например, температура вспышки и балл «10» определяются на верхней контрольной границе «зеленой зоны». При определении рейтинговых значений таких параметров, как индекс вязкости (рис. 8, а), когда лучшая производительность находится в рабочей зоне и приближение значений к верхней ($B_{р.д}$) или нижней ($H_{р.д}$) границе рабочего диапазона является одинаково неблагоприятным, будут использоваться выражения (3) и (4) соответственно:

$$\Theta_{ij} = 10 \frac{P_{в.к} - P_d}{P_{в.к} - B_{р.д}}, \quad (3)$$

$$\Theta_{ij} = 10 \frac{P_{н.к} - P_d}{P_{н.к} - H_{р.д}}, \quad (4)$$

После перевода системных переменных анализируемого масла к кодированным значениям формируется матрица параметров процесса (МПП): строки матрицы — приведенные к безразмерным единицам параметры исследуемой системы, столбцы — время наработки двигателя в часах:

$$\begin{array}{c|ccccccc} & T_1 & T_2 & \dots & \dots & T_j & \dots & T_m \\ \hline & & & & & & & \\ & & & & \dots & & & \\ \Pi_1 & \Theta_{11} & \Theta_{12} & \dots & \dots & \Theta_{1j} & \dots & \Theta_{1m} \\ \Pi_2 & \Theta_{21} & \Theta_{22} & \dots & \dots & \Theta_{2j} & \dots & \Theta_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Pi_i & \Theta_{i1} & \Theta_{i2} & \dots & \dots & \Theta_{ij} & \dots & \Theta_{im} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Pi_n & \Theta_{n1} & \Theta_{n2} & \dots & \dots & \Theta_{nj} & \dots & \Theta_{nm} \end{array} \quad (5)$$

Участок функции для приведения системных переменных к безразмерным величинам с дальнейшим формированием МПП на языке Python показан на рис. 8.

```
35 def marix():
36     df = pd.DataFrame(new_data['LubricantHours'])
37     for key in elements.keys():
38         if key in names:
39             k = elements[key][0] # нижняя
40             l = elements[key][1]
41         else:
42             k = elements[key][1]
43             l = elements[key][0] # нижняя
```

Рис. 8. Часть функции перевода количественных значений к нормированным с последующим составлением МПП

Индекс эффективности — ИЭФ (рис. 9, а) каждого исследуемого элемента масла определяется согласно следующим выражениям:

$$\text{ИЭФ}_i = F_i m, \quad i = 1, 2 \dots n; \quad (6)$$

$$\frac{1}{F} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{M_{ij}}, \quad (7)$$

где M_{ij} — точка данных матричного профиля;

m — строки;

n — столбцы.

Часть функции для определения ИЭФ на языке Python приведена на рис. 9, б.

а)

Параметры	Время работы оборудования (ч)							ИЭФ
	7121	8392	9662	10930	12198	13480	...	
Al (Алюминий) (ppm)	9,50	9,25	8,50	8,50	8,50	8,25	...	8,60
Cr (Хром) (ppm)	10,00	10,00	9,75	9,50	10,00	9,75	...	9,89
Cu (Медь) (ppm)	10,00	10,00	9,94	9,94	10,00	10,00	...	9,98
Fe (Железо) (ppm)	9,14	8,86	8,57	8,00	8,79	8,43	...	8,59
Ni (Никель) (ppm)	4,75	1,75	0,00	0,00	0,00	0,00	...	0,00
Pb (Свинец) (ppm)	10,00	10,00	10,00	9,94	9,94	10,00	...	9,97
Sn (Олово) (ppm)	9,50	10,00	9,75	9,00	9,50	10,00	...	9,78
Na (Натрий) (ppm)				4,86	6,57	5,57	...	4,90
Si (Кремний) (ppm)	8,20	8,00	7,40	7,00	7,00	6,80	...	7,14
V (Ванадий) (ppm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	...	0,00
Вязкость кинематическая при 100 °C	6,02	6,24	6,27	6,39	6,02	6,02	...	6,35
Щелочное число (мгКОН/г)	2,19	2,15	0,24	0,00	4,39	5,20	...	0,00
Вода (объем, %)	7,80	7,60	7,60	7,00	9,20	4,40	...	7,45
Температура вспышки (SETA)	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	...	6,67
Содержание нерастворимого осадка (объем, %)	8,20	7,60	9,33	9,33	9,33	9,33	...	7,64

б)

```

54 def IF(df):
55     new_df = pd.DataFrame()
56     df.index = new_data['LubricantHours']
57     df = df.T
58     for i in df.index:
59         l = []
60         d = []
61         n = 1
62         for k in df.loc[i]:
63             if np.isnan(1 / k):
64                 d.append(1 / k)
65                 n += 0
66             else:
67                 l.append(1 / k)

```

Рис. 9. Определение индекса эффективности параметра

Общую оценку эффективности для каждой переменной в системе дает определение среднего значения и среднеквадратического отклонения. Позиция рабочей характеристики, стремящаяся к нулевому значению, указывает на то, что работа масляной системы осуществляется вблизи неприемлемого предела по данному параметру, следовательно, математическое отражение работы должно быть восприимчиво к низким значениям точек данных.

Суммирование обратного значения каждой системной переменной при определении индекса эффективности необходимо во избежание перекрытия особенно низких показаний высокими, что происходит, когда вычисляется только среднее значение. Показатели производительности, представленные в диапазоне от 0 до 10 независимо от количества переменных, участвующих обработке, используются для простоты анализа.

Вслед за числовым определением индекса эффективности по каждому из выбранных параметров для зрительной оценки и простоты восприятия вывод данных, помимо цифровых значений,

представлен в цветовом решении ((палитра от насыщенного зеленого (индекс эффективности близок к десяти) до темно-красного (индекс эффективности параметра приближается к нулевому значению)). Визуальная категоризация системы масла в программе «Макава» задается с использованием стандартной библиотеки для работ с таблицами Pandas. Приоритетом использования Python является поддержка библиотеки Pandas, которая идеально подходит для обработки больших наборов данных.



Рис. 10. Графическое отображение оценки ИЭФ и «всплывающее окно» с информацией для пользователя

Графический интерфейс для предлагаемого генератора данных десктопного приложения «Макава» был создан с использованием библиотеки Tkinter. Также при помощи данной библиотеки формируется «всплывающее окно» для привлечения внимания пользователя к параметрам, значения индекса эффективности которых переходят порог в 4,99 в сторону нулевого значения, попадая в «красную зону», и появляется информация о том, что необходимо обратить внимание на механизмы, износ или неисправности которых вызывают изменение исследуемых элементов (рис. 10).

Заключение (Conclusion)

Разработка новых методов диагностики судового оборудования, во избежание последствий отказов, вызывает интерес как владельцев судов, так и организаций, призванных обеспечивать безопасность судоходства. Одной из причин аварийности на водном транспорте является отказ двигательной установки [20], [21]. Применение предложенной компьютерной программы на основе математического метода служит частью алгоритмов функционального диагностирования системы наблюдения за состоянием элементов дизельных двигателей.

Использование системы алгоритмов при функциональной диагностике позволяет судам, находящимся в море, применяя минимальное количество дополнительных приборов, выполнять анализ рабочих параметров масла, получаемых в обязательном порядке согласно требованиям МКУБ (Резолюция № А.741(18) Международной морской организации (ред. от 21.06.2013) «Международный кодекс по управлению безопасной эксплуатацией судов и предотвращением загрязнения»).

Новым подходом в системе отслеживания и прогноза состояния СЭУ является возможность обработки лабораторных анализов отработанного масла двигателя с последующим накоплением и структурированием информации о состоянии элементов двигателя. Разработанное программное обеспечение, планируемое к подаче на государственную регистрацию, дает возможность сопоставлять результаты новых лабораторных исследований с известными ранее, и на их основе рассчитывать вероятность отказа и визуализировать результаты расчетов.

Pandas и Tkinter — основные библиотеки, применяемые в создании проекта «Макава», автоматически исключают проблему с вычислением данных временных рядов, такую как выбросы. Программное обеспечение «Макава» может быть доработано путем добавления некоторых параметров управления, таких как выбор марки масла, выбор кластера и т. д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yin Y. Parallel-machine scheduling of deteriorating jobs with potential machine disruptions / Y. Yin, Y. Wang, T. C. E. Cheng, W. Liu, J. Li // *Omega*. — 2017. — Vol. 69. — Pp. 17–28. DOI: 10.1016/j.omega.2016.07.006.
2. Gualeni P. Life cycle performance assessment tool development and application with a focus on maintenance aspects / P. Gualeni, G. Flore, M. Maggioncalda, G. Marsano // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2019. — Vol. 7. — Is. 8. — Pp. 280. DOI: 10.3390/jmse7080280.
3. Hou X. Study on the corrosion and wear behaviors of cylinder liner in marine diesel engine burning low sulfur fuel oil / X. Hou, Y. Wang, L. Dai, Y. Yang, J. Du, Y. Wang, H. Wan // *Engineering Failure Analysis*. — 2023. — Vol. 147. — Pp. 107151. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107151.
4. Rao X. Corrosion behaviors of cylinder liner in marine diesel engine burning low sulfur fuel oil: An experimental and molecular dynamics simulation study / X. Rao, C. Sheng, Z. Guo, C. Xu, L. Dai, C. Yuan // *Tribology International*. — 2022. — Vol. 171. — Pp. 107575. DOI: 10.1016/j.triboint.2022.107575.
5. Гужвенко И. Н. Исследование трибологических характеристик деталей цилиндропоршневой группы судового дизельного двигателя методом ускоренных испытаний в смазочной среде, содержащей слоистые модификаторы трения / И. Н. Гужвенко, В. А. Чанчиков, Л. Баракат, Н. В. Прямухина, Е. А. Стринжа, О. П. Ковалев // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2019. — № 1–4 (43). — С. 75–82.
6. Ломухин В. Б. Использование модификатора моторного масла на основе серпентина и мягких металлов в судовых энергетических установках / В. Б. Ломухин, А. О. Токарев, В. В. Сургин, И. В. Лаптева // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока*. — 2014. — № 3. — С. 136–139.
7. НД № 2–030101–009. Приложения к руководству по техническому наблюдению за судами в эксплуатации. — СПб.: Российский Морской Регистр Судоходства, 2022. — 407 с.
8. Тарасов М. И. Кинетика старения моторного масла в судовых дизелях при непрерывном и периодическом его доливе для компенсации угара / М. И. Тарасов, Г. П. Кича // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. — 2023. — № 1. — С. 7–14. DOI: 10.24143/2073-1574-2023-1-7-14.
9. Aminikhanghahi S. A survey of methods for time series change point detection / S. Aminikhanghahi, D. J. Cook // *Knowledge and information systems*. — 2017. — Vol. 51. — Is. 2. — Pp. 339–367. DOI: 10.1007/s10115-016-0987-z.
10. Обрубов М. О. Применение LSTM-сети в решении задачи прогнозирования многомерных временных рядов / М. О. Обрубов, С. Ю. Кириллова // *Национальная Ассоциация Ученых*. — 2021. — № 68–2. — С. 43–48. DOI: 10.31618/nas.2413–5291.2021.2.68.450.
11. Соболенко А. Н. Браковочные показатели регенерированного в установке «РУМС-1» и свежего моторных масел / А. Н. Соболенко, В. В. Тарасов, М. И. Тарасов // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. — 2021. — № 2 (47). — С. 29–35. DOI: 10.24866/2227-6858/2021-2-4.
12. Безменов И. В. Метод очистки измерительных данных от выбросов: поиск оптимального решения с минимальным количеством отбракованных результатов измерений / И. В. Безменов // *Измерительная техника*. — 2023. — № 1. — С. 16–23. DOI: 10.32446/0368-1025it.2023-1-16-23.
13. Nemetz S. A standardized corpus for SQLite database forensics / S. Nemetz, S. Schmitt, F. Freiling // *Digital Investigation*. — 2018. — Vol. 24. — Pp. S121–S130. DOI: 10.1016/j.diin.2018.01.015.
14. Seeling P. Dataset for WWW landing pages webobject retrieval performance evaluation / P. Seeling // *Data in Brief*. — 2020. — Vol. 30. — Pp. 105429. DOI: 10.1016/j.dib.2020.105429.

15. Олимпиев Н. В. Исследование возможности использования Python-приложения для интеграции систем отслеживания ошибок / Н. В. Олимпиев // Наукосфера. — 2022. — № 1–2. — С. 153–158.
16. Ryu Y. Performance and emission characteristics of additives-enhanced heavy fuel oil in large two-stroke marine diesel engine / Y. Ryu, Y. Lee, J. Nam // Fuel. — 2016. — Vol. 182. — Pp. 850–856. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.06.029.
17. Wilton P. Beginning SQL / P. Wilton, J. W. Colby. — Wiley Publishing, Inc., 2005. — 501 p.
18. РД 31.2.07–2001. Топлива, масла, смазки и специальные жидкости для судов морского транспорта. Номенклатура и область применения. — СПб.: ЗАО “ЦНИИМФ”, 2001. — 105 с.
19. Liu J. S. The multi-factor design evaluation of antenna structures by parameter profile analysis / J. S. Liu, G. Thompson // Journal of Engineering Manufacture. — 1996. — Vol. 210. — Is. 5. — Pp. 449–456. DOI: 10.1243/PIME_PROC_1996_210_142_02.
20. Глазюк Д. К. Анализ аварийности морского флота РФ в период 2016–2021 гг / Д. К. Глазюк, З. А. Щербань // Научные труды Дальрыбвтуза. — 2022. — Т. 60. — № 2. — С. 49–55.
21. Обзор аварийности с судами на море и на внутренних водных путях Российской Федерации за 2022 год [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://butc.ru/f/2022.pdf> (дата обращения: 01.07.2023).

REFERENCES

1. Yin, Yunqiang, Yan Wang, T.C.E. Cheng, Wenqi Liu, and Jinhai Li. “Parallel-machine scheduling of deteriorating jobs with potential machine disruptions.” *Omega* 69 (2017): 17–28.
2. Gualeni, Paola, Giordano Flore, Matteo Maggioncalda, and Giorgia Marsano. “Life cycle performance assessment tool development and application with a focus on maintenance aspects.” *Journal of Marine Science and Engineering* 7.8 (2019): 280. DOI: 10.3390/jmse7080280.
3. Hou, Xianbin, Yuxin Wang, Leyang Dai, Yuhao Yang, Jinhong Du, Yongjian Wang, and Hong Wan. “Study on the corrosion and wear behaviors of cylinder liner in marine diesel engine burning low sulfur fuel oil.” *Engineering Failure Analysis* 147 (2023): 107151. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107151.
4. Rao, Xiang, Chenxing Sheng, Zhiwei Guo, Chang Xu, Leyang Dai, and Chengqing Yuan. “Corrosion behaviors of cylinder liner in marine diesel engine burning low sulfur fuel oil: An experimental and molecular dynamics simulation study.” *Tribology International* 171 (2022): 107575. DOI: 10.1016/j.triboint.2022.107575.
5. Guzhenko, Ivan N., Vasily A. Chanchikov, Lama Barakat, Nina V. Pryamukhina, Ekaterina A. Strynzha, and Oleg P. Kovalev. “Studying the tribological characteristics of cylinder- piston group parts of a marine diesel engine with the accelerated tests method in lubricating medium containing laminated friction modifiers.” *Marine Intelligent Technologies* 1–4(43) (2019): 75–82.
6. Lomukhin, V.B., A. O. Tokarev, V. V. Surgin, and I. V. Lapteva. “The use of engine oil based on serpentine and soft metals in ship power installations.” *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* 3 (2014): 136–139.
7. ND № 2–030101–009. Prilozheniya k rukovodstvu po tekhnicheskemu nablyudeniyu za sudami v ekspluatatsii. SPb.: Rossiiskii Morskoi Registr Sudokhodstva, 2022.
8. Tarasov, Maxim Igorevich, and Gennadiy Petrovich Kicha. “Kinetics of motor oil aging in marine diesel engines under continuous and periodic refill to compensate loss.” *Vestnik of Astrakhan state technical university. Series: marine engineering and technologies* 1 (2023): 7–14. DOI: 10.24143/2073-1574-2023-1-7-14.
9. Aminikhanghahi, Samaneh, and Diane J. Cook. “A survey of methods for time series change point detection.” *Knowledge and information systems* 51.2 (2017): 339–367. DOI: 10.1007/s10115-016-0987-z.
10. Obrubov, Maxim Olegovich, and Svetlana Yurievna Kirillova. “Using LSTM network for solving the multidimensional time series forecasting problem.” *National Association of Scientists* 68–2 (2021): 43–48.
11. Sobolenko, Anatoly, Valery Tarasov, and Maxim Tarasov. “Rejection indicators of motor oils — fresh one, and the one recovered in RUMS-1 unit.” *FEFU: School of Engineering Bulletin* 2(47) (2021): 29–35.
12. Bezmenov, Igor V. “Method of cleaning measurement data from outliers: search for the optimal solution with the minimum number of rejected measured data.” *Izmeritel'naya Tekhnika* 1 (2023): 16–23. DOI: 10.32446/0368-1025it.2023-1-16-23.
13. Nemetz, Sebastian, Sven Schmitt, and Felix Freiling. “A standardized corpus for SQLite database forensics.” *Digital Investigation* 24 (2018): S121–S130. DOI: 10.1016/j.diin.2018.01.015.
14. Seeling, Patrick. “Dataset for WWW landing pages webobject retrieval performance evaluation.” *Data in Brief* 30 (2020): 105429. DOI: 10.1016/j.dib.2020.105429.

15. Olimpiev, Nikita Valerievich. "Research of the using possibility of a python application for the bug tracking systems integration." *Naukosfera* 1–2 (2022): 153–158.
16. Ryu, Younghyun, Youngseo Lee, and Jeonggil Nam. "Performance and emission characteristics of additives-enhanced heavy fuel oil in large two-stroke marine diesel engine." *Fuel* 182 (2016): 850–856. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.06.029.
17. Wilton, Paul, and John W. Colby. *Beginning SQL*. Wiley Publishing, Inc., 2005.
18. RD 31.2.07–2001. Topлива, masla, smazki i spetsial'nye zhidkosti dlya sudov morskogo transporta. Nomenklatura i oblast' primeneniya. SPb.: ZAO "TsNIIMF", 2001.
19. Liu, J. S., and G. Thompson. "The multi-factor design evaluation of antenna structures by parameter profile analysis." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 210.5 (1996): 449–456. DOI: 10.1243/PIME_PROC_1996_210_142_02.
20. Glazyk, Dmitry K., and Zakhar A. Shcherban. "Analysis of the accident rate of the Russian navy in the period 2016–2021." *Scientific Journal of the Far East State Technical Fisheries University* 60.2 (2022): 49–55.
21. Obzor avariinosti s sudami na more i na vnutrennikh vodnykh putyakh Rossiiskoi Federatsii za 2022 god. Web. 1 July 2023 <<https://butc.ru/f/2022.pdf>>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мазур Екатерина Владимировна — ассистент
ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»
236041, Российская Федерация, Калининград, ул. А. Невского, 14
e-mail: ekaterina.mazur@gmail.com

Великанов Николай Леонидович — доктор технических наук, профессор
ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»
236041, Российская Федерация, Калининград, ул. А. Невского, 14
e-mail: NVelikanov@kantiana.ru

Мазур Валерия Сергеевна — аспирант
Научный руководитель:
Попадьин Константин Юрьевич — кандидат биологических наук
ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»
236041, Российская Федерация, Калининград, ул. А. Невского, 14
e-mail: valeriya.mazur@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mazur, Ekaterina V. — Assistant
Immanuel Kant Baltic Federal University
14 A. Nevskogo Str., Kaliningrad, 236016, Russian Federation
e-mail: ekaterina.mazur@gmail.com

Velikanov, Nikolay L. — Dr. of Technical Sciences, professor
Immanuel Kant Baltic Federal University
14 A. Nevskogo Str., Kaliningrad, 236016, Russian Federation
e-mail: NVelikanov@kantiana.ru

Mazur, Valeriya S. — Postgraduate Supervisor:
Popadin, Konstantin Yu. — PhD
Immanuel Kant Baltic Federal University
14 A. Nevskogo Str., Kaliningrad, 236016, Russian Federation
e-mail: valeriya.mazur@gmail.com

Статья поступила в редакцию 9 июня 2023 г.
Received: June 9, 2023.

Научное периодическое издание

**Вестник Государственного университета морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

Том 15. № 4

2023 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать с оригинал-макета 30.08.23. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 20,75. Тираж 500 экз. Заказ № 471/23

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7