

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 12. № 5

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

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2020

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб. : ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2020. — Т. 12. — № 5. — 146 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 диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук по основным группам специальностей в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников **05.22.00 «Транспорт»** в разделах: «Эксплуатация водного транспорта, судовождение», «Водные пути сообщения и гидрография»; **05.08.00 «Кораблестроение»** в разделах: «Судостроение и судоремонт», «Судовые энергетические установки, системы и устройства»; **05.09.00 «Электротехника»** в разделе «Электротехнические комплексы и системы».

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 «Газеты. Журналы» агентства Роспечать: 37276.



СОДЕРЖАНИЕ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ	831
<i>Смоленцев С. В., Филяков А. Е.</i> Оценка степени опасности сближения на основе динамического судового домена безопасности	831
<i>Каретников В. В., Агеева Н. С., Привалов А. А.</i> Принципы поддержки принятия решений для управления качеством услуг в корпоративной мультисервисной сети бассейновых администраций внутренних водных путей	840
<i>Кузнецов А. Л., Борович А. З., Радченко А. А.</i> Стратегия управления штабелем контейнерного терминала	853
<i>Малыхин А. С.</i> Оптимизация маршрута контейнерной линии на основе распределения грузов между портами и хинтерлендами	861
<i>Шувалов Ю.Ю., Шувалова Е. В.</i> Технология погрузки угля в специализированные контейнеры на углепогрузочном комплексе	868
<i>Соболев А. С., Доровской В. А., Сметюх Н. П.</i> Метод компараторной идентификации таксономии морских объектов	877
<i>Дьяконова М. Д., Семенов А. Д.</i> Оценка времени выполнения послерейсовых операций сотрудниками судовладельца методами имитационного моделирования	884
ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ	894
<i>Ратнер Е. А., Зайцев А. И., Квасной М. А.</i> Сплайн-интерполяция для построения трехмерных батиметрических моделей при картографировании внутренних водных путей	894
СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ	906
<i>Москаленко М. А., Друзь И. Б., Москаленко В. М.</i> Методологические подходы к проектированию морских транспортных судов с использованием математических моделей комплексного показателя и оценок риска	906
<i>Герман А. П., Кулеш В. А., Фам Чунг Хиен.</i> Разработка схем усиления судна для взаимодействия с грунтом	915
СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА	926
<i>Федоровская Н. К.</i> Повышение экологической безопасности систем охлаждения судовых энергетических установок за счет утилизации теплоты	926
<i>Ивановская А. В., Жуков В. А.</i> Моделирование расчетных нагрузок, действующих со стороны траловой системы на лебедку рыбопромыслового судна	935

Том 12. № 5

2020

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Гл. редактор

С. О. Барышников

д.т.н., проф.

rector@gumrf.ru

Зам. гл. редактора

А. П. Нырклов

д.т.н., проф.

NyrkovaP@gumrf.ru

С. Гуцма

Морская академии (г. Щецин, Польша), д.т.н., проф.

Г. В. Егоров

ген. директор ЗАО «Морское инженерное бюро — СПб», д.т.н., проф.

Р. Качиньски

проректор по развитию и сотрудничеству Технического университета (г. Белосток, Польша), д.т.н., проф.

А. И. Пошивай

заместитель руководителя Федерального агентства морского и речного транспорта

А. Е. Сазонов

д.т.н., проф.,

чл.-кор. РАН

Р. М. Юсупов

научный руководитель Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН, д.т.н., проф., чл.-кор. РАН

РЕДАКЦИЯ:

E-mail: journal@gumrf.ru

http://journal.gumrf.ru

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-54734 от 17.07.2013 г.

Адрес редакции: 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7.

Подписной индекс в каталоге Роспечать — 37276.

Все материалы, поступившие в редакцию, рецензируются.

Члены редколлегии:	
<i>О. К. Безюков</i> , д.т.н.	
<i>А. Т. Беккер</i> , д.т.н.	
<i>Н. И. Ватин</i> , д.т.н.	
<i>П. А. Гарибин</i> , д.т.н.	
<i>Д. П. Голоскоков</i> , д.т.н.	
<i>В. А. Жуков</i> , д.т.н.	
<i>Ю. М. Искандеров</i> , д.т.н.	
<i>О. Г. Каратаев</i> , д.т.н.	
<i>В. В. Каретников</i> , д.т.н.	
<i>А. В. Кириченко</i> , д.т.н.	
<i>М. Н. Кирсанов</i> , д.ф.-м.н.	
<i>М. А. Колосов</i> , д.т.н.	
<i>Е. А. Королева</i> , д.э.н.	
<i>И. И. Костылев</i> , д.т.н.	
<i>А. Л. Кузнецов</i> , д.т.н.	
<i>С. Е. Кузнецов</i> , д.т.н.	
<i>Е. А. Лаврентьева</i> , д.э.н.	
<i>В. А. Логиновский</i> , д.т.н.	
<i>В. Е. Марлей</i> , д.т.н.	
<i>А. М. Никитин</i> , д.т.н.	
<i>Т. А. Пантина</i> , д.э.н.	
<i>Л. И. Погодаев</i> , д.т.н.	
<i>В. И. Решняк</i> , д.т.н.	
<i>В. В. Романовский</i> , д.т.н.	
<i>А. В. Саушев</i> , д.т.н.	
<i>С. В. Смоленцев</i> , д.т.н.	
<i>А. Л. Степанов</i> , д.т.н.	
<i>М. В. Сухотерин</i> , д.т.н.	
<i>Е. Г. Трунин</i> , к.э.н.	
<i>А. Л. Тезиков</i> , д.т.н.	
<i>В. Б. Чистов</i> , д.т.н.	

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ.....945

Кузин А. Ю., Лукичев Д. В., Демидова Г. Л. Мультиагентная система управления распределенной энергосистемой945

ЭКСПЕДИЦИЯ ПО БАЛТИЙСКОМУ И СЕВЕРНОМУ МОРЯМ955

Смирнова Е. С., Семиделова А. О., Лузина А. В. Гидрометеорологические наблюдения в Балтийском и Северном морях во время рейса УПС «Мир» (апрель–июль 2019 г.)955

CONTENTS

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION	831
<i>Smolentsev S. V., Filyakov A. E.</i> Convergence danger degree assessment based on the dynamic ship's safety domain.....	831
<i>Karetnikov V. V., Ageeva N. S., Privalov A. A.</i> Decision support principles for managing the quality of services in the corporate multiservice network of inland waterway Basin Administrations.....	840
<i>Kuznetsov A. L., Borevich A. Z., Radchenko A. A.</i> Container terminal stack management strategy.....	853
<i>Malykhin A. S.</i> Container line route optimization based on cargo distribution between ports and hinterlands.....	861
<i>Shuvalov Yu. Yu., Shuvalova E. V.</i> Technology of loading coal into specialized containers at the coal-loading complex.....	868
<i>Sobolev A. S., Dorovskoy V. A., Smetyh N. P.</i> Method of comparative identification of marine objects taxonomy.....	877
<i>Diakonova M. D., Semenov A. D.</i> Evaluation of post-voyage operations duration by the shipowner's employees using simulation modelling methods.....	884
WATERWAYS AND HYDROGRAPHY	894
<i>Ratner E. A., Zaitsev A. I., Kvasnoy M. A.</i> Spline interpolation for building three-dimensional bathymetric models at charting inland waterways.....	894
SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR	906
<i>Moskalenko M. A., Druz I. B., Moskalenko V. M.</i> Methodological approaches to the design of marine vessels with the use of mathematical models of a comprehensive indicator and risk assessments.....	906
<i>German A. P., Kulesh V. A., Pham Trung Hiep.</i> Development of the vessel strengthening schemes for ground contact.....	915
SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES	926
<i>Fedorovskaya N. K.</i> Increasing the environmental safety of the cooling systems for ship power plants due to heat recovery.....	926
<i>Ivanovskaya A. V., Zhukov V. A.</i> Simulation of design loads, acting from the side of the trawl system on the fishing vessel winch.....	935
ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS	945
<i>Kuzin A. Yu., Lukichev D. V., Demidova G. L.</i> Multi-agent system for distributed energy system control.....	945

Volume 12. № 5

2020

EDITOR-IN-CHIEF

S. O. Baryshnikov
doctor of technical Sciences, Prof.
rector@gumrf.ru

Deputy Editor-in-Chief

A. P. Nyrkov
doctor of technical Sciences, Prof.
NyrkovAP@gumrf.ru

S. Gutsma

Maritime Academy (g.Schetsin, Poland), doctor of technical Sciences, Prof.

G. V. Yegorov

General Director of "Marine Engineering Bureau - St. Petersburg", doctor of technical Sciences, Prof.

R. Kachin'ski

Vice-Rector for Development and Cooperation of the Technical University (Bialystok, Poland), doctor of technical Sciences, Prof.

A. I. Poshivay

Deputy Head of the Federal Agency of Sea and River Transport

A. Ye. Sazonov

doctor of technical Sciences, Prof., corresponding member of the Russian Academy of Sciences

M. Yusupov

scientific leader of "St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS", doctor of technical Sciences, Prof., corresponding member of the Russian Academy of Sciences

EDITORIAL STAFF:

E-mail: journal@gumrf.ru

http://journal.gumrf.ru

**Editorial
Collegium:**
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
V. A. Zhukov,
 doctor of technical Sciences
Y. M. Iskanderov,
 doctor of technical Sciences
O. G. Karatayev,
 doctor of technical Sciences
V. V. Karetnikov,
 doctor of technical Sciences
A. V. Kirichenko,
 doctor of technical Sciences
M. N. Kirsanov,
 doctor of phys.-math. Sciences
M. A. Kolosov,
 doctor of technical Sciences
Ye. A. Koroleva,
 doctor of economic Sciences
I. I. Kostylev,
 doctor of technical Sciences
A. L. Kuznetsov,
 doctor of technical Sciences
 S. Ye. Kuznetsov,
 doctor of technical Sciences
Ye. A. Lavrentyeva,
 doctor of economic Sciences
V. A. Loginovskiy,
 doctor of technical Sciences
V. Ye. Marley,
 doctor of technical Sciences
A. M. Nikitin,
 doctor of technical Sciences
T. A. Pantina,
 doctor of economic Sciences
L. I. Pogodayev,
 doctor of technical Sciences
V. I. Reshnyak,
 doctor of technical Sciences
V. V. Romanovskiy,
 doctor of technical Sciences
A. V. Saushev,
 doctor of technical Sciences
S. V. Smolentsev,
 doctor of technical Sciences
A. L. Stepanov,
 doctor of technical Sciences
M. V. Sukhoterin,
 doctor of technical Sciences
Ye. G. Trunin,
 candidate of economic Sciences
A. L. Tezikov,
 doctor of technical Sciences
V. B. Chistov,
 doctor of technical Sciences

EXPEDITION IN THE BALTIC AND NORTH SEAS955

Smirnova E. S., Semidelova A. O., Lusina A. V. Hydrometeorological observations in the Baltic and North Seas during the voyage of the Sailing Training Vessel «Mir» (April–July of 2019).....955

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-831-839

CONVERGENCE DANGER DEGREE ASSESSMENT BASED ON THE DYNAMIC SHIP'S SAFETY DOMAIN

S. V. Smolentsev, A. E. Filyakov

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

The problem of navigation safety is considered, in particular, the problem of assessing the degree of danger in a situation of ships convergence is studied. The hazard assessment of a ship-approaching situation is based on the safety domain as the minimum area around the ship that an oncoming ship should not enter. The existing safety domains are specified, the requirements for the safety domain are defined. The original configuration of the safety domain is proposed. The proposed safety domain is asymmetric and takes into account not only the requirements of the International Regulations for the Prevention of Collisions at Sea (COLREG-72), but also good maritime practice. In this case, the dimensions of the safety domain of a particular vessel are tied to the maneuverable characteristics of this vessel or, in a simplified form, to its dimensions. Thus, the ship's safety domain defines the area around the ship within which it can safely make an emergency evasion maneuver from an oncoming ship. The position of the safety domain boundary is parameterized and depends on the value of one parameter, which is computationally convenient. In addition, it is noted that the border of the proposed security zone is smooth, which excludes jumps in solutions for different course angles of targets entry into this zone. The concept of a dynamic safety domain is proposed, the size of which can vary depending on the navigation area and weather conditions, which is especially important when the vessel moves in narrow spaces, channels and traffic separation systems, since it excludes the appearance of false alarms when the vessel, which moves in the opposite direction in its lane, enters into domain.

Keywords: ship domain, circulation diameter, channels, narrows, Closest Point of Approach, Time of Closest Point of Approach, Distance to Closest Point of Approach, COLREG, maneuver, domain configuration.

For citation:

Smolentsev, Sergey V., and Alexey E. Filyakov. "Convergence danger degree assessment based on the dynamic ship's safety domain." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.5 (2020): 831–839. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-831-839.

УДК 656.61.052:658.011.56

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ СБЛИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОГО СУДОВОГО ДОМЕНА БЕЗОПАСНОСТИ

С. В. Смоленцев, А. Е. Филяков

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

Рассмотрена проблема безопасности мореплавания, в частности исследована задача оценки степени опасности в ситуации сближения судов. Оценка опасности ситуации сближения судов строится на основе домена безопасности как минимальной области вокруг судна, в которую не должно заходить встречное судно. Указаны существующие домены безопасности, определены требования к домену безопасности. Предложена оригинальная конфигурация домена безопасности. Предложенный домен безопасности является ассиметричным и учитывает не только требования «Международных правил по предупреждению столкновений судов в море (МППСС-72)», но и хорошую морскую практику. При этом размеры домена безопасности конкретного судна привязаны к маневренным характеристикам этого судна или, в упрощенном

виде, к его размерениям. Таким образом, домен безопасности судна определяет область вокруг судна в пределах которой оно может безопасно совершить аварийный маневр по уклонению от встречного судна. Положение границы домена безопасности параметризовано и зависит от значения одного параметра, что удобно в вычислительном плане. Кроме того, отмечается, что граница предлагаемой зоны безопасности является гладкой, что исключает скачки решений для различных курсовых углов входа целей в эту зону. Предложена концепция динамического домена безопасности, размер которого может изменяться в зависимости от района плавания и погодных условий, что особенно важно при движении судна в узкостях, каналах и системах разделения движения, поскольку исключает появление ложных тревог при попадании внутрь домена судна, которое движется во встречном направлении в своей полосе движения.

Ключевые слова: судовой домен безопасности, диаметр циркуляции, каналы, узкостям, Closest Point of Approach, Time of Closest Point of Approach, Distance to Closest Point of Approach, МППСС, маневр, конфигурация домена.

Для цитирования:

Смоленцев С. В. Оценка степени опасности сближения на основе динамического судового домена безопасности / С. В. Смоленцев, А. Е. Филяков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 5. — С. 831–839. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-831-839.

Введение (Introduction)

Безопасность судовождения — одна из важных категорий, связанная с эксплуатацией морского транспорта. В настоящее время рост объема морских перевозок и интенсивности движения судов в зонах с повышенным судоходством приводит к повышению нагрузки на судоводителей, вследствие чего наблюдается увеличение риска опасных ситуаций и аварий. Как показывает практика, наибольшее число нештатных ситуаций и аварий происходит в зонах ответственности портов, на подходах к портам и в узких проходах (каналах). Для решения этой проблемы были предложены различные модели и методы оценки безопасности при сближении судов. В данной статье рассматриваются оценка степени опасности сближения на основе динамического судового домена безопасности.

Целью и задачами данного исследования является рассмотрение новых подходов для создания более универсального домена безопасности для различных условий плавания, навигационной обстановки и интенсивности движения. Для данного домена предложена оригинальная конфигурация на базе эллипсов со смещением вправо. Такая конфигурация предоставляет больше возможностей для маневрирования судна и отклонения при нештатных ситуациях. Предложенный домен безопасности является ассиметричным и может изменяться в зависимости от той или иной навигационной ситуации.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Существующие подходы к определению домена безопасности

В методах оценки риска столкновения базовым понятием является «дистанция кратчайшего сближения судов» (Closest Point of Approach (CPA)). Считается, что при безопасном движении дистанция кратчайшего сближения судов должна быть больше некоторого критического значения. Учитываются также величины «время движения до точки кратчайшего сближения судов» (Time of Closest Point of Approach (TCPA)) и «расстояние до точки кратчайшего сближения судов» (Distance to Closest Point of Approach (DCPA)) [1].

Для моделирования риска столкновений используется представление о некоторой «зоне безопасности» вокруг каждого судна, называемой «доменом безопасности», для установления которой обычно используют окружающую судно и жестко связанную с ним область. В настоящее время при исследовании проблемы предупреждения столкновений судов рассматриваются различные виды доменов: круговые, эллиптические, в виде полигонов или более сложных фигур (рис. 1).

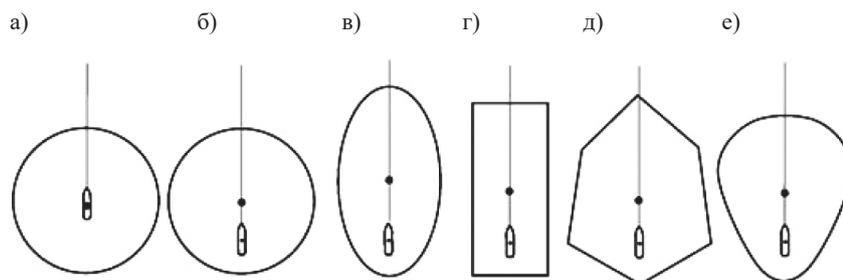


Рис. 1. Возможные формы домена судна: а, б — круговые; в — эллиптическая; г — в виде полигонов; д, е — в виде более сложных фигур

Границу домена можно рассматривать как функцию курсового угла q судна:

$$d^s = Cf_d(q), \quad (1)$$

где d^s — расстояние от точек границы домена до центра массы судна;

C — коэффициент, учитывающий особенности ситуации.

Кроме того, были рассмотрены эллиптические домены безопасности Фудзии и Танака [2], а также корабельный домен Колдуэлла, имеющий различную конфигурацию в зависимости от того или иного сценария сближения судов, и домен Гудвина, разделенный на сектора [3], [4].

Существующий подход к определению домена безопасности рассматривает каждый домен в отдельности. Поэтому в полной мере такой домен не может решить некоторые задачи расхождения, такие как плавания в узкостях и системах разделения движения (СРД) из-за строго определенных границ домена. Поэтому для решения подобных задач предлагается более универсальный и гибкий динамический домен безопасности [5].

Предлагаемая конфигурация домена безопасности

Основные требования к домену безопасности. Предлагаемый домен безопасности создается для более гибкого решения задачи по безопасному расхождению судов. Необходимо создать такой домен, который динамически мог изменяться в зависимости от условий плавания. Для этого нужно учитывать:

1. Правила МППСС [6].
2. Навигационные особенности района плавания:
 - узкости;
 - системы разделения движения;
 - каналы.
3. Интенсивность мореплавания в зоне.
4. Гидрометеорологическую обстановку, в частности условия видимости.
5. Динамику судна, в частности его управляемость и диаметр циркуляции судна.

При этом форма границы домена должна быть гладкой во избежание скачков решений при незначительных изменениях параметров сближения судов.

Учет Правил МППСС-72. В данном случае можно использовать расширенную секторную модель:

- S0 — носовой сектор (10° левого и правого бортов);
- S1 — правый сектор ($10,0$ – $112,5^\circ$ правого борта);
- S2 — левый сектор ($10,0$ – $112,5^\circ$ левого борта);
- S3 — кормовой сектор (от $112,5^\circ$ правого борта до $112,5^\circ$ левого борта).

Расстояния от судна до границы домена безопасности должны зависеть от сектора следующим образом: $DS0 > DS1 > DS2 > DS3$. Эти неравенства формализуют следующие положения: по носу нужно держать максимально свободное пространство, поскольку скорость сближения с целями, которые находятся по носу, максимальна, и кроме того МППСС-72 не рекомендованы

маневры, пересекающие путь другого судна по носу¹. С правого борта нужно держать достаточное пространство для маневрирования собственного судна, поскольку, согласно требованиям МППСС-72, предпочтительными являются маневры судна на правый борт [6]. Судно, пересекающее путь по корме, может считаться менее опасным, чем находящееся с других направлений.

Учет навигационных особенностей района плавания. Навигационные особенности района плавания (береговая линия, ограничивающая изобата, навигационные опасности, наличие районов регламентированного движения и т. п.), видимо, должны учитываться при формировании домена безопасности. Таким образом, домен безопасности в условиях наличия навигационных ограничений должен отличаться от домена безопасности на чистой воде. В частности, необходимо учитывать минимальное расстояние до опасностей в данном районе, а также наличие зон регламентированного движения в системах разделения движения (СРД). При движении в узкости поперечный размер домена безопасности (расстояние от судна до границы зоны навигационной безопасности (ЗНБ)) не должен превышать $\frac{1}{4}$ ширины узкости, в противном случае встречные суда будут ошибочно восприниматься как опасные. При движении по своей полосе в СРД поперечный размер домена безопасности не должен превышать $\frac{1}{2}$ ширины полосы движения, иначе встречные суда, идущие по своей полосе, будут ошибочно восприниматься как опасные.

Учет гидрометеорологической обстановки. Прежде всего необходимо учитывать изменения условий видимости. В условиях ограниченной видимости необходимо увеличивать размеры домена безопасности. Рекомендованное максимальное расстояние до границы ЗНБ-2 мили определяется по дистанции слышимости судовых сигналов, подаваемых в тумане [6]. Однако современные технические средства позволяют надежно обнаруживать встречное судно в тумане и без звуковых сигналов. Кроме того, в условиях тумана суда, согласно требованиям МППСС, должны двигаться с меньшей скоростью и держать машину в готовности к маневру. Таким образом, можно уменьшить максимальное расстояние до границы ЗНБ как минимум вдвое.

Кроме того, в случае несовпадения вектора движения судна с направлением его диаметральной плоскости (например, вследствие дрейфа из-за влияния сильного бокового ветра или течения) важно определить правильную ориентацию домена безопасности (в случае, если это не круговой домен). При использовании секторной модели сектора должны назначаться относительно диаметральной плоскости (ДП) судна [7].

Учет динамики судна и параметров управляемости судна. Управляемость судна также зависит от конструктивных качеств, эксплуатационных характеристик и внешних факторов, оказывающих влияние на маневренность судна. К основным конструкционным качествам, оказывающим влияние на управляемость, относятся:

- соотношения главных размерений корпуса: длина, ширина.
- тип движительно-рулевого комплекса.

Эксплуатационные причины, оказывающие влияние на управляемость судна:

- степень загрузки (в грузу, порожнем);
- равномерность распределения груза (по длине, ширине, загрузка на ровный киль, наличие крена и дифферента).

Для оценки маневренных характеристик судов ИМО выделяет следующие существенные качества²:

1. Собственная динамическая устойчивость.
2. Устойчивость на курсе.
3. Начальная поворотливость.
4. Контроль рыскливости.
5. Поворотливость.
6. Тормозные характеристики [8], [9].

¹ МППСС-72 (<http://www.mppss.ru/rules/>).

² Assessment of the traffic in the Baltic Sea West. IMO, 2005.

Параметр управляемости может быть определен из маневренных элементов судна (рис. 2).

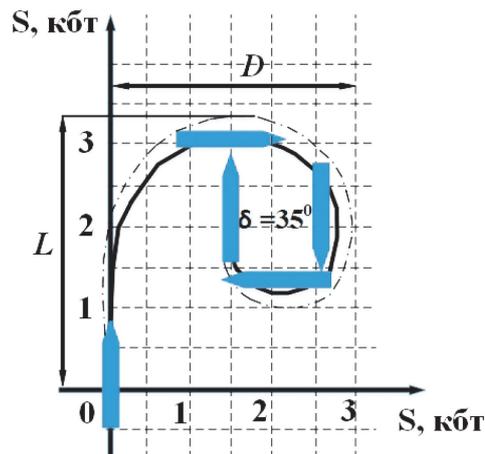


Рис. 2. Циркуляция на правый борт

Для создания динамически изменяющегося домена безопасности, во-первых, важно знать диаметр циркуляции судна. Как показано на рис. 2, чем меньше циркуляция судна, тем быстрее он совершит маневр в случае нештатной ситуации. Во-вторых, необходимо, чтобы в секторе *I* по носу было достаточно пространства для маневра. Согласно правилам МППСС-72, предпочтительно осуществлять маневры на правый борт [10]–[12].

Результаты (Results)

С учетом требований к домену безопасности, а также изложенной ранее информации предлагается следующая результирующая конфигурация домена безопасности:

1. Ориентация домена безопасности по ДП судна.
2. Домен безопасности определяется относительно геометрического центра судна.
3. Пространство вокруг судна разбивается на четыре четверти.
4. Форма границы домена безопасности формируется по четвертям (рис. 3) для открытого моря:
 - четверть *1* — эллипс с осями $4S-2S$ (центр совпадает с центром судна);
 - четверть *2* — эллипс с осями $4S-3S$ (центр совпадает с центром судна);
 - четверти *3* и *4* — эллипс с осями $1S-2,5S$ (центр смещен вправо на $0,5S$).

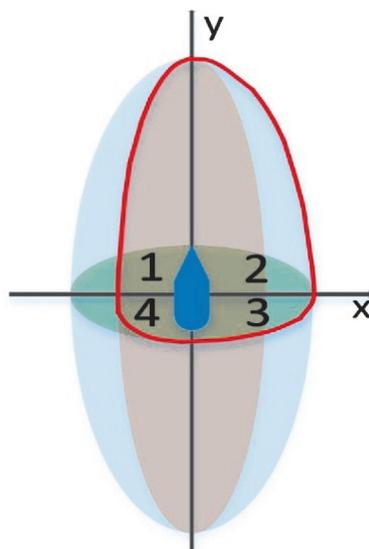


Рис. 3. Конфигурация домена безопасности для открытого моря по четвертям

В узкостях и СРД, если ширина домена безопасности превышает половину ширины безопасного прохода D_{\min} :

$$5S > D_{\min}$$

Для формирования домена безопасности используется ограничивающая ширина (рис. 4):

- четверть 1 — эллипс с осями $4S - 2D_{\min}/5$ (центр совпадает с центром судна);
- четверть 2 — эллипс с осями $4S - 3D_{\min}/5$ (центр совпадает с центром судна);
- четверти 3–4 — эллипс с осями $1S - D_{\min}/2$ (центр смещен вправо на $0,1D_{\min}$).

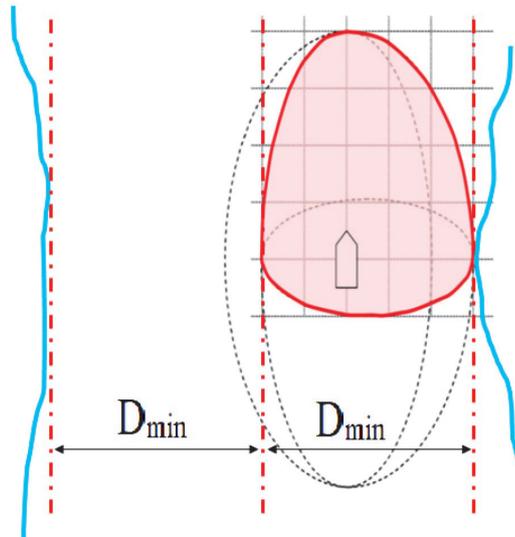


Рис. 4. Конфигурация домена безопасности для условий узкостей

5. Параметр S определяется из маневренных характеристик судна и условий плавания.

После формирования домена безопасности получаем параметризованную модель этого домена с гладкой границей [13].

Базовый динамический домен безопасности для открытого моря. Предложенная конфигурация базового домена безопасности позволяет менять форму от условия плавания и имеет параметризованную модель с гладкой границей рис. 5. Параметр S должен зависеть от маневренных характеристик судна, которые, в свою очередь, зависят от текущей скорости и загрузки судна.

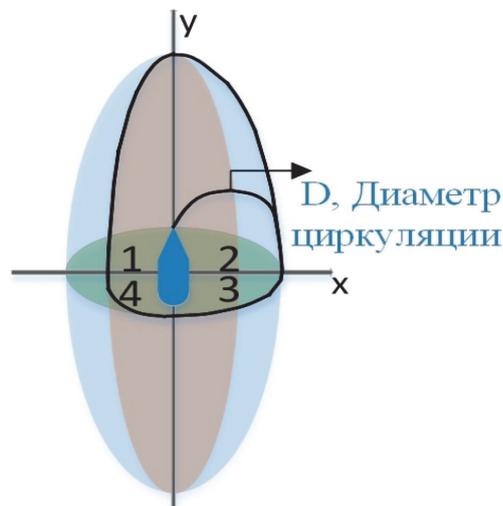


Рис. 5. Базовый динамический домен безопасности для открытого моря

Предлагается следующая зависимость от маневренных характеристик:

$$S = D_{\text{цирк}} / 3, \quad (5)$$

где $D_{\text{цирк}}$ — диаметр циркуляции судна при маневре «Право на борт» в текущем состоянии судна (скорость, загрузка, глубина под килем).

Таким образом, при указанном маневре, который может считаться *маневром последнего момента*, траектория судна полностью находится в собственном домене безопасности.

Однако, поскольку текущие маневренные характеристики судна трудно идентифицируемы, в качестве параметра S предлагается использовать более грубую, но более доступную для определения характеристику, — длину судна. Таким образом, в условиях нормальной видимости: $S = L$ и в условиях ограниченной видимости, в соответствии с ранее изложенными положениями, касающимися результирующей конфигурации домена безопасности, предлагается использовать увеличенное значение: $S = 1,5L$ [14].

Заключение (Conclusion)

Предложенная конфигурация домена безопасности позволяет учитывать в оценке уровня опасности сближения положения МППСС, навигационные особенности района плавания и гидрометеорологическую обстановку. Это важно при движении судна в узкостях, каналах и системах разделения движения поскольку исключает появление ложных тревог при попадании внутрь домена безопасности судна, которое движется во встречном направлении в своей полосе движения. Положение границы домена безопасности параметризовано и зависит от значения одного параметра, что удобно для выполнения вычислений. Кроме того, граница предлагаемой зоны безопасности является гладкой, что исключает скачки решений для различных курсовых углов входа целей в эту зону.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гриняк В. М. Методы оценки риска столкновения в системах управления движением судов / В. М. Гриняк // Современные проблемы науки и образования. — 2015. — № 1-1. — С. 171.
2. Fujii Y. Traffic capacity / Y. Fujii, K. Tanaka // The Journal of navigation. — 1971. — Vol. 24. — Is. 4. — Pp. 543–552. DOI: 10.1017/S0373463300022384.
3. Goodwin E. M. A statistical study of ship domains / E. M. Goodwin // The Journal of navigation. — 1975. — Vol. 28. — Is. 3. — Pp. 328–344. DOI: 10.1017/S0373463300041230.
4. Davis P. V. A computer simulation of marine traffic using domains and arenas / P. V. Davis, M. J. Dove, C. T. Stockel // The journal of Navigation. — 1980. — Vol. 33. — Is. 2. — Pp. 215–222. DOI: 10.1017/S0373463300035220.
5. Tam C. K. Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters / C. K. Tam, R. Bucknall, A. Greig // The Journal of Navigation. — 2009. — Vol. 62. — Is. 3. — Pp. 455–476. DOI: 10.1017/S0373463308005134.
6. Коккрофт А. Н. Толкование МППСС-72 / А. Н. Коккрофт, Дж. Н. Ф. Ламейер; пер. с англ. (с небольшими сокр.) Н. Я. Брызгина и Н. Т. Шайхутдинова; под ред. Н. Я. Брызгина. — М.: Транспорт, 1981. — 280 с.
7. Егоров И. Б. Концепция зон навигационной безопасности и ее применение в судовождении / И. Б. Егоров, В. А. Логиновский // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 3 (69). — С. 13–17.
8. Гриняк В. М. Визуальное представление параметров траектории безопасного движения судна / В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный, М. В. Трофимов // Морские интеллектуальные технологии. — 2016. — № 3-1 (33). — С. 269–273.
9. Бурмака А. И. Стратегия расхождения судов в ситуации чрезмерного сближения / А. И. Бурмака // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 1 (23). — С. 20–22.
10. Студеникин Д. Е. Применение систем принятия решений для выбора параметров маневра судна / Д. Е. Студеникин, А. А. Григорян, Н. А. Маковецкая // Эксплуатация морского транспорта. — 2015. — № 4 (77). — С. 58–62.

11. Васьков А. С. Способы представления зоны навигационной безопасности судна / А. С. Васьков, М. А. Гарашенко // Эксплуатация морского транспорта. — 2017. — № 3 (84). — С. 38–44.
12. Гриняк В. М. Нечеткая система распознавания опасного сближения судов на морских акваториях / В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2014. — № 11 (125). — С. 36–42.
13. Zhao J.-S. Comments of ship domains / J.-S. Zhao, Z.-L. Wu, F.-C. Wang, E. M. Goodwin // The Journal of Navigation. — 1993. — Vol. 46. — No. 3. — Pp. 422–436.
14. Головченко Б. С. Нечеткая система предупреждения о опасном сближении морских судов / Б. С. Головченко, В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 15–25. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-15-25.

REFERENCES

1. Grinyak, V. M. “Review of collision risk assessment methods for vessel traffic systems.” *Modern problems of science and education* 1-1 (2015): 171.
2. Fujii, Yahei, and Kenichi Tanaka. “Traffic capacity.” *The Journal of navigation* 24.4 (1971): 543–552. DOI: 10.1017/S0373463300022384.
3. Goodwin, Elisabeth M. “A statistical study of ship domains.” *The Journal of navigation* 28.3 (1975): 328–344. DOI: 10.1017/S0373463300041230.
4. Davis, P. V., M. J. Dove, and C. T. Stockel. “A computer simulation of marine traffic using domains and arenas.” *The journal of Navigation* 33.2 (1980): 215–222. DOI: 10.1017/S0373463300035220.
5. Tam, CheeKuang, Richard Bucknall, and Alistair Greig. “Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters.” *The Journal of Navigation* 62.3 (2009): 455–476. DOI: 10.1017/S0373463308005134.
6. Cockcroft, A. N., and J. N. F. Lameijer. *A guide to the collision avoidance rules*. London: Stanford Maritime Ltd., 1976.
7. Egorov, I. B., and V. A. Loginovskiy. “Review of ship domain concept and it’s application in navigation.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(69) (2012): 13–17.
8. Grinyak, V. M., A. S. Devyatisil’nyi, and M. V. Trofimov. “Vizual’noe predstavlenie parametrov traektorii bezopasnogo dvizheniya sudna.” *Marine Intelligent Technologies* 3-1(33) (2016): 269–273.
9. Burmaka, A. I. “The strategy of divergence of ships in a situation of excessive convergence.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(23) (2014): 20–22.
10. Studenikin, D., A. Grigoryan, and N. Makovetskaya. “The use of decision support systems for choosing parameters of vessel’s maneuvering.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4(77) (2015): 58–62.
11. Vaskov, A. S., and M. A. Garashchenko. “The methods for conception of ship’s domain.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(84) (2017): 38–44.
12. Grinyak, V. M., and A. S. Devyatisilny. “Fuzzy logic decision-making system for ships collision avoidance.” *Herald of computer and information technologies* 11(125) (2014): 36–42.
13. Zhao Jing-Sung, Zhao-Lin Wu, Feng-Chen Wang, and E.M. Goodwin. “Comments of ship domains.” *The Journal of Navigation* 46.3 (1993): 422–436.
14. Golovchenko, B. S., V. M. Grinyak, and A. S. Devyatisilny. “Fuzzy logic decision-making system for ships collision avoidance.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(29) (2015): 15–25. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-15-25.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Smolentsev, 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: sswasily@mail.ru,
SmolencevSV@gumrf.ru

Филяков Алексей Евгеньевич —
старший преподаватель
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_avt@gumrf.ru, icedi@rambler.ru

Filyakov, Alexey E. —
Senior Lecturer
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_avt@gumrf.ru, icedi@rambler.ru

*Статья поступила в редакцию 10 октября 2020 г.
Received: October 10, 2020.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-840-852

DECISION SUPPORT PRINCIPLES FOR MANAGING THE QUALITY OF SERVICES IN THE CORPORATE MULTISERVICE NETWORK OF INLAND WATERWAY BASIN ADMINISTRATIONS

V. V. Karetnikov¹, N. S. Ageeva², A. A. Privalov³

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

² — Military Telecommunications Academy, St. Petersburg, Russian Federation

³ — Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russian Federation

Proposals for modifications of operational decision support methods for service quality management in the corporate multiservice communication network of the Volga-Balt Administration (Federal Budgetary Institution) have been developed. This multiservice network is based on the Next Generation Network. Such networks have a single hierarchical automated management system, the task of which is to ensure the sustainable functioning of both the administrative management bodies of the Volga-Balt Administration of various levels of the administrative hierarchy, and providing technological management of automated technical means for ensuring safe navigation. The features of the communication network of the Volga-Balt Administration are a large spatial scope, a large number of heterogeneous subscribers who need various communication services with given characteristics, as well as high dynamics of changing their condition. The automated network management system in these operating conditions must maintain the required quality of communication services. Thus, the relevance of the work is determined by the need to implement network management processes in a mode close to the real-time mode with a given quality, in conditions of dynamic change in the performance parameters and state of network elements. The basis of the proposed principles for supporting management decisions is the concept of the use of intelligent agents. In the developed approach, intelligent agents are functionally hierarchical fuzzy situational networks in which solutions, unlike methods based on the application of reference situations, are developed based on the results of solutions of the hierarchical system of optimization problems based on fuzzy mathematical programming methods. Coordination and adjustment of solutions of the optimization tasks system is carried out on the basis of the Bellman-Zade principle. This allows you to significantly reduce the time to solve optimization problems and get Pareto - optimal solutions for managing the quality of communication services. Intelligent agents can implement management solutions in automatic mode, provided that the network administrator delegates such capabilities to them.

Keywords: corporate multiservice network, hierarchical fuzzy situational network, intelligent agent, fuzzy logical output, fuzzy mathematical programming, operation of communication systems in water transport.

For citation:

Karetnikov, Vladimir V., Nina S. Ageeva, and Andrey A. Privalov. "Decision support principles for managing the quality of services in the corporate multiservice network of inland waterway Basin Administrations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.5 (2020): 840–852. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-840-852.

УДК 681.142.33.681.14

ПРИНЦИПЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ УСЛУГ В КОРПОРАТИВНОЙ МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ СЕТИ БАССЕЙНОВЫХ АДМИНИСТРАЦИЙ ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЕЙ

В. В. Каретников¹, Н. С. Агеева², А. А. Привалов³

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

² — Военная академия связи, Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ — ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Разработаны предложения по модификации методов оперативной поддержки принятия решений для управления качеством услуг корпоративной мультисервисной сети связи Федерального бюджетного учреждения «Администрация «Волго-Балт» — мультисервисной сети, созданной на основе системотехнических принципов связи нового поколения (Next Generation Network). Подобные сети имеют единую иерархическую автоматизированную систему управления, задачей которой является обеспечение как устойчивого функционирования органов административного управления Федерального бюджетного учреждения «Администрация «Волго-Балт» различных уровней административной иерархии, так и технологического управления автоматизированными техническими средствами, необходимыми для безопасного судоходства. Особенности сети связи Федерального бюджетного учреждения «Администрация «Волго-Балт» являются большой пространственный размах и разнородный контингент абонентов, которым необходимо предоставить различные услуги связи с заданными характеристиками. Подчеркивается, что автоматизированная система управления сетью в этих условиях функционирования должна поддерживать необходимое качество услуг связи. Таким образом, актуальность работы определяется объективной необходимостью управления сетью в режиме реального времени с требуемым качеством в условиях динамического изменения параметров функционирования и состояния сетевых элементов. Отмечается, что основой предложенных принципов поддержки принятия управленческих решений являются принципы концепции интеллектуальных агентов. В разработанном в исследовании подходе интеллектуальные агенты функционально представляют собой иерархические нечеткие ситуационные сети, в которых решения, в отличие от методов, основанных на применении эталонных ситуаций, вырабатываются по результатам иерархической системы оптимизационных задач с использованием методов нечеткого математического программирования. В работе координация и согласование решений системы оптимизационных задач выполнены на основе принципа Беллмана – Заде, что позволяет существенно снизить время решения оптимизационных задач и получить Парето-оптимальные решения по управлению качеством услуг связи. Интеллектуальные агенты могут реализовывать управленческие решения в автоматическом режиме при условии делегирования им соответствующих полномочий администратором сети.

Ключевые слова: корпоративная мультисервисная сеть, иерархическая нечеткая ситуационная сеть, интеллектуальный агент, нечеткий логический вывод, нечеткое математическое программирование, эксплуатация систем связи на водном транспорте.

Для цитирования:

Каретников В. В. Принципы поддержки принятия решений для управления качеством услуг в корпоративной мультисервисной сети бассейновых администраций внутренних водных путей / В. В. Каретников, Н. С. Агеева, А. А. Привалов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 5. — С. 840–852. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-840-852.

Введение (Introduction)

В настоящее время эксплуатация внутренних водных путей (ВВП) Российской Федерации для обеспечения высокого уровня безопасности судоходства осуществляется пятнадцатью администрациями бассейнов (АБ). В качестве основных задач АБ ВВП, независимо от специфики обслуживаемой акватории ВВП, можно выделить следующие: эксплуатация и развитие водных путей и гидротехнических сооружений, обеспечение безопасности судоходства, а также диспетчерское регулирование движения судов и обеспечение лоцманской проводки судов. Для решения указанных АБ обладают весьма развитой инфраструктурой, включающей средства оперативной радиосвязи, автоматизированные системы управления, автоматические идентификационные системы, системы дифференциальной коррекции местоположения и др. Однако перспективы развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации в сочетании с необходимостью цифровизации отрасли требуют повышения скорости, надежности и оперативности передачи данных в эксплуатируемых в настоящее время сетях связи. Одним из конструктивных решений в данном случае может считаться внедрение корпоративных мультисервисных сетей связи и передачи данных. Организация таких сетей в полной мере укладывается в концепцию создания на ВВП Российской Федерации инфокоммуникационных иерархических триад типа: корпоративная речная информационная система – речная информационная служба – автоматизированная система управления движением судов: «КРИС – РИС – АСУ ДС».

Рассмотрим основные принципы поддержки принятия решений для управления качеством услуг в корпоративной мультисервисной сети на примере Федерального бюджетного учреждения

«Администрация «Волго-Балт» (ФБУ «Администрация «Волго-Балт»), обеспечивающего диспетчерское управление судоходством, которое включает устойчивое непрерывное управление распределенными системами радиосредств, системами радиотехнических средств, береговыми системами мониторинга данных судопотока и системами обеспечения безопасности судоходства. Для обеспечения производственной деятельности в ФБУ «Администрация «Волго-Балт» внедрена автоматизированная система управления производством (АСУП), которая в том числе применяется для реализации организационно-технического управления филиалами и имеет возможность обеспечивать взаимодействие с другими отраслевыми организациями. Следовательно, корпоративную мультисервисную сеть связи администрации Волго-Балтийского бассейна (КМСС ВБ) можно отнести к классу *критических инфраструктур*.

Основными особенностями КМСС ВБ являются значительный пространственный размах, большое количество разнородных абонентов, которым необходимы услуги связи с заданными характеристиками в различных условиях эксплуатации этой сети. В процессе эксплуатации КМСС ВБ возможны динамические случайные изменения как топологии КМСС ВБ, так и состава ее технических средств, добавления или исключения из сети различного числа абонентов. Кроме того, КМСС ВБ должна иметь возможность взаимодействия и связи с другими КМСС (например, с сетями других операторов связи или учреждений). Сложность информационно-логической и физической архитектур КМСС ВБ, ее гетерогенность, необходимость анализа большого количества различных сетевых характеристик и параметров, многомерность, стохастичность и нелинейность протекающих в ней физических и информационных процессов являются причинами объективных трудностей принятия рациональных управленческих решений автоматизированной системой управления КМСС ВБ (АСУС) по поддержанию ее характеристик в оптимальном состоянии, в том числе и по поддержанию необходимого качества услуг связи (QoS — Quality of Service) [1].

Следует отметить, что КМСС ВБ представляет собой большую распределенную и сложную систему. Особенности КМСС ВБ вызывают большие трудности в применении концепций и методов оперативного управления КМСС ВБ, основанных на использовании моделей объекта управления, а также методов, базирующихся на применении различных статистических методов [2], [3]. Это обстоятельство привело к необходимости применения для решения задач управления КМСС ВБ интеллектуальных методов, основанных, например, на применении и реализации концепции интеллектуальных агентов (ИА) [4], техническая реализация которых позволяет сократить время цикла управления. Вместе с тем для технической реализации концепции ИА необходимо разработать устойчивые к изменению в широких пределах сетевых характеристик и простых в реализации алгоритмов оценки функционального и технического состояния сетевых элементов, функционирующих качественно в режиме реального времени. Таким образом, актуальность работы определяется необходимостью реализации процессов оперативного управления сетью, в том числе оперативным управлением характеристиками QoS, в режиме, близком к режиму реального времени с заданным качеством, в условиях динамического изменения параметров функционирования и состояния сетевых элементов (СЭ).

Методы и материалы (Methods and Materials)

Технически КМСС ВБ реализована как пакетная мультисервисная сеть связи, созданная и функционирующая на основе стека протоколов TCP/IP/MPLS. КМСС ВБ создается и функционирует на основе единых системотехнических принципов функционирования и управления как единая сеть. Пространственно-географическое расположение основных абонентов КМСС ВБ показано на рис. 1.

В основе архитектурных решений по построению и функционированию КМСС ВБ концептуальные принципы создания сетей Next Generation Network (NGN — сети связи следующего поколения) и концептуальные принципы IP Multimedia Subsystem (IMS), основными из которых являются [2], [5], [6]:

– интеграция в существующую учрежденческую сеть связи, при необходимости в Единую систему электросвязи Российской Федерации (ЕСЭ РФ), обеспечение поддержки новых транспортных технологий и привычных моделей управления сетью;

- модульность архитектурного построения;
- повышение производительности за счет добавления в систему дополнительных серверов;
- реализация единой автоматизированной системы управления услугами связи с заданным качеством (QoS);
- возможность взаимодействия с сетями различного типа;
- обеспечение масштабируемости КМСС ВБ.



Рис. 1. Пространственно-географическое расположение абонентов КМСС ВБ

КМСС ВБ состоит из совокупности локальных вычислительных сетей пользователей (LAN), объединенных в единую систему глобальные сети связи (WAN). Технической основой КМСС ВБ является функционально структурированная совокупность узлов коммутации пакетов (маршрутизаторов), скоростных каналов связи, серверов услуг и сервисов и автоматизированной системы управления связью (АСУС). Обобщенная функциональная структура КМСС ВБ приведена на рис. 2.

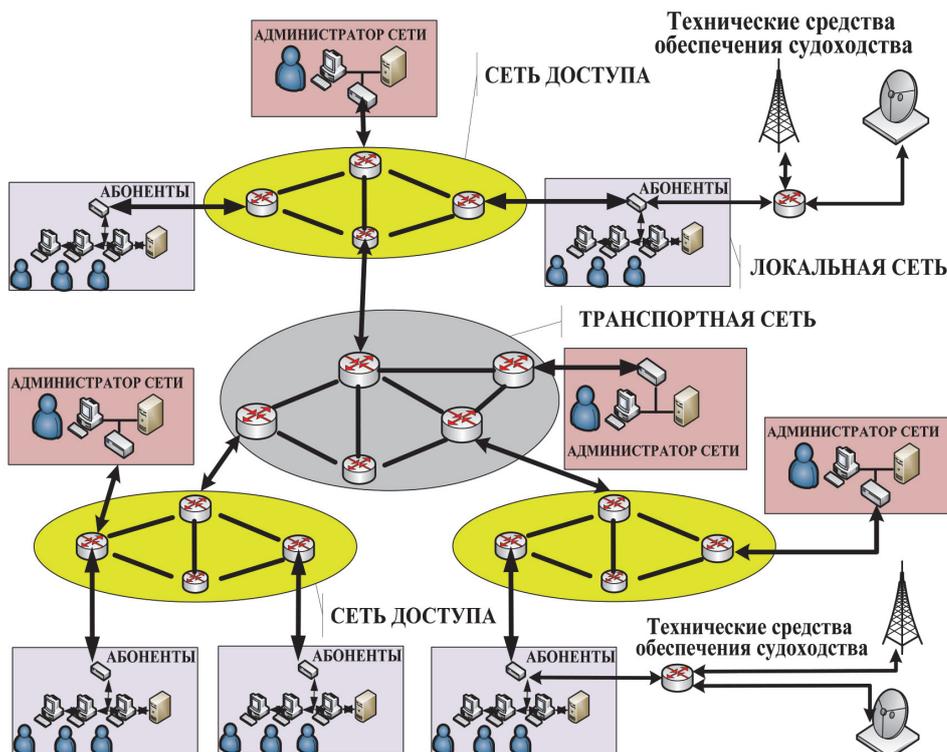


Рис. 2. Обобщенная функциональная структура КМСС ВБ

Основными услугами связи, предоставляемыми КМСС ВБ пользователям, являются услуги *мягкого реального времени* (файловый обмен, электронная почта), различные услуги *жесткого реального времени* (IP-телефония, мультимедийные конференции, передача различного рода управляющей информации и сигналов оповещения). К основным услугам связи следует также отнести передачу различного рода управляющей информации, предназначенной для обеспечения устойчивого и непрерывного управления распределенными системами радиосредств, системами радиотехнических средств, береговыми системами мониторинга данных судопотока и системами обеспечения безопасности судоходства. К основной услуге связи также следует отнести защиту циркулирующей в сети информации [4].

Качество обслуживания определяется рекомендациями ITU – T.Y.1540 и Y.1541 [6], [7]. К основным сетевым характеристикам, оказывающим влияние на качество услуг связи, относятся:

- техническое состояние сети и отдельных ее элементов;
- вероятности потери передаваемых IP-пакетов;
- пропускная способность сети или пропускные способности отдельных каналов связи, бит/с;
- время задержки передачи пакетов;
- вариация времени задержки передачи пакетов.

В рекомендациях ITU – T.Y.1221 указаны сетевые параметры, определяющие для различных приложений необходимые пропускные способности [8].

Требуемый уровень QoS в КМСС ВБ, как и в сетях категории NGN, обеспечивается с помощью использования следующих основных способов [2], [9]:

1. В плоскости управления применяются механизмы управления доступом, резервирования ресурсов (например, применением протокола RSVP), QoS-маршрутизации.

2. В плоскости данных применяются механизмы управления буферами маршрутизаторов, прогнозирования, предотвращения и управления перегрузками трафика, маркировки пакетов, планирования и управления очередями, механизмы анализа и классификации трафика.

3. В плоскости менеджмента применяются механизмы сетевых измерений, а также обеспечения и контроля выполнения соглашений уровня QoS-SLA (Service Level Agreement).

Управление QoS в КМСС ВБ выполняется АСУС. АСУС КМСС ВБ создается и функционирует на основе концепции иерархического сетевого управления, определяемой моделью Telecommunication Management Network (TMN) [2], [10].

Процесс принятия рациональных решений по управлению QoS КМСС ВБ представляет собой выбор рациональной альтернативы из множества возможных. При этом данный процесс является задачей многокритериальной оптимизации [3], [11], [12]. Решаемые задачи имеют различный уровень иерархии сетевого управления в модели TMN. Задачи нижних уровней иерархии могут иметь противоречивые критерии оптимизации. Следовательно, необходимо проводить процедуры координации и согласования как критериев решаемых задач, так и полученных решений [11]–[13].

Основным принципом функционирования ИА является принцип *ситуация – действие* [11], [13], [14], реализуемый с использованием нечетких методов и моделей. Суть данного принципа заключается в анализе и автоматическом регулировании модели процесса управления КМСС ВБ. Основные методы и алгоритмы, применяемые для решения подобных задач, рассмотрены, например, в источнике [15].

В данной работе предложено построение и использование иерархических нечетких ситуационных сетей на основе *метода нечеткого логического вывода Мамдани* [16], [17]. В данном случае управленческие решения, в отличие от методов, использующих эталонные ситуации, вырабатываются как результат решения иерархической упорядоченной совокупности оптимизационных задач на основе *методов нечеткого математического программирования* [14], [18], [19]. Координация и согласование решений, а также систем ограничений набора оптимизационных задач выполняются на основе *принципа Беллмана – Заде* [14], [15], [18]. Результаты проведенного анализа основных задач, решаемых при обеспечении заданных уровней QoS в КМСС ВБ, позволили составить их структуру иерархического взаимодействия, приведенную на рис. 3.

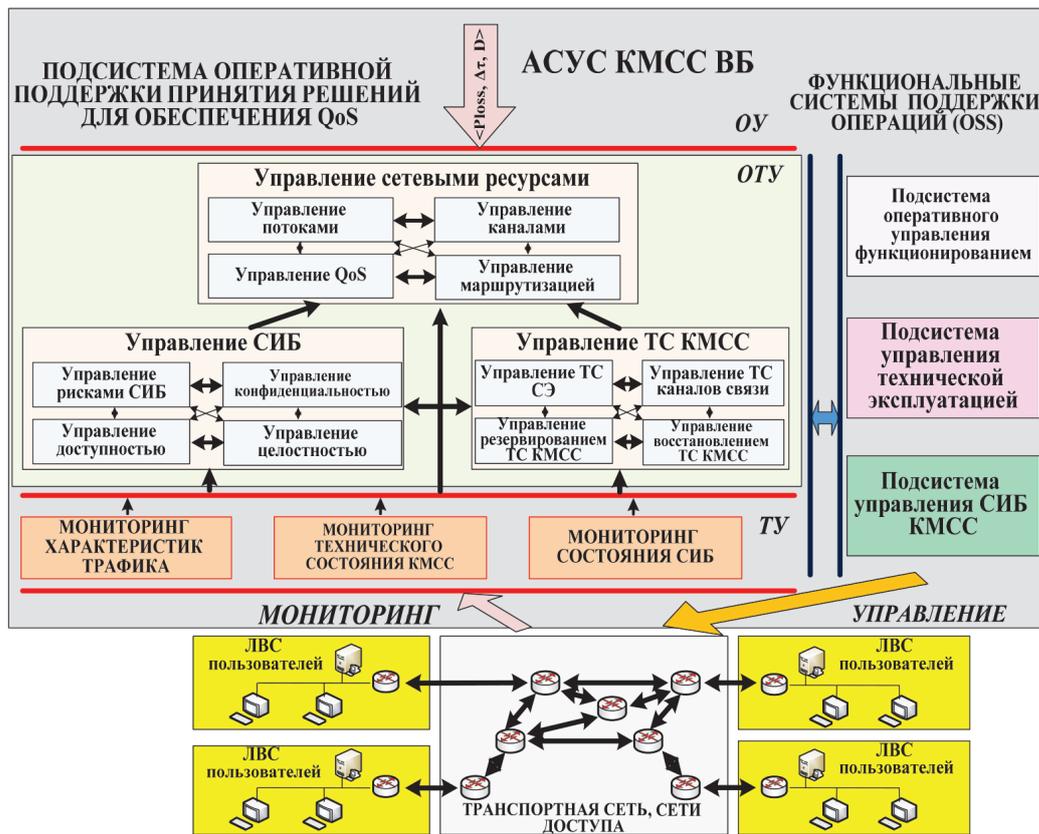


Рис. 3. Структура иерархического взаимодействия задач по управлению QoS КМСС ВБ

Решения задач оперативной поддержки принятия решений по управлению QoS производятся в подсистеме оперативной поддержки принятия решений (ПОППР), которая является функциональной подсистемой АСУС КМСС ВБ. Реализация полученных решений выполняется с помощью подсистем поддержки операций (OSS). Основными задачами, результаты решений которых оказывают влияние на процесс управления QoS, являются: управление сетевыми ресурсами, управление текущим техническим состоянием сети и ее СЭ, управление сетевой и информационной безопасностью (СИБ) [4].

Реализацию предложенного подхода предлагается выполнять на основе базовой функциональной структуры ИА (БФС ИА), которая приведена на рис. 4.

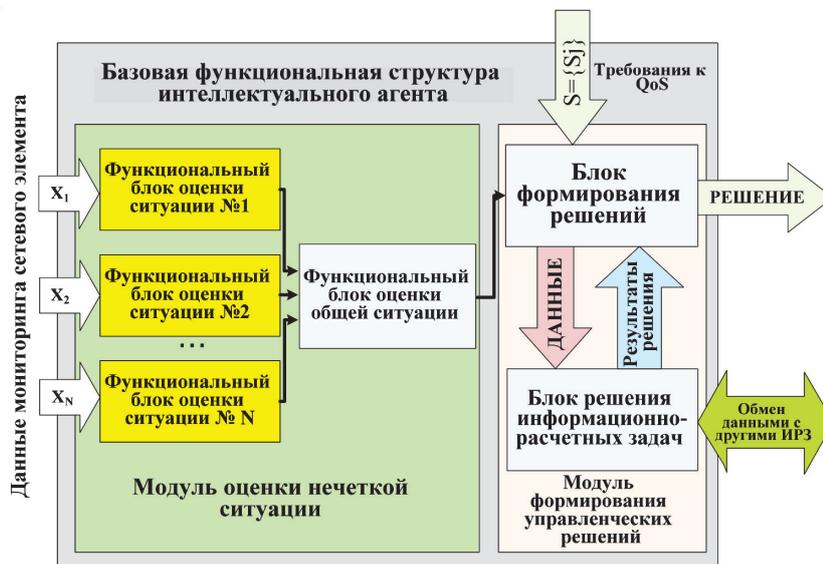


Рис. 4. Базовая функциональная структура ИА КМСС ВБ

В БФС ИА состоит из модуля оценки нечеткой ситуации состояния СЭ, состоящего из иерархической совокупности машин нечеткого логического вывода Мамдани для каждой функциональной группы СЭ, а также модуля формирования решений, состоящего из блоков формирования и выработки решений информационно-расчетных задач. В случае, если администратор сети предоставляет ИА возможность реализации принятого решения через систему управления СЭ, то цикл управления будет реализовываться в автоматическом режиме. В этом случае ИА только уведомляет администратора о реализованных решениях по управлению СЭ или сетевого домена в целом [11], [14].

Рассмотрим кратко принцип функционирования ИА. Пусть $X = \{x_{f1}, x_{f2}, \dots, x_{fm}\}$ — множество признаков, характеризующих состояние функциональной группы СЭ (например, параметры трафика на интерфейсах маршрутизатора или параметры его текущего технического состояния) [4], [11].

Пусть признаки $x_{fi}, i = \overline{1, m}$, характеризующие состояние выбранной функциональной группы СЭ, описываются лингвистическими переменными:

$$x_{fi}, T_i, U_i, \quad (1)$$

где $T_i = \{T_1^i, T_2^i, \dots, T_m^i\}$ — терм-множества лингвистических переменных; U_i — базовое множество признака x_{fi} ; m — число нечетких значений признака x_{fi} .

Термы $T_j^i (i = \overline{1, m}, j = \overline{1, k})$ определяются с помощью нечетких множеств A_{ij} , рассчитываемых с помощью значений функций принадлежности $\mu_{A_{ij}}(x_{fi})$ в базовых множествах $x_{fi} \in U_i$:

$$A_{ij} = \left\{ \left(\frac{\mu_{A_{ij}}(x_{fi})}{x_{fi}} \right) \right\}, x_{fi} \in U_i. \quad (2)$$

В этом случае оценка нечеткой ситуации состояния СЭ ИА может быть представлена как результат, полученный на выходе иерархической системы машин нечеткого логического вывода Мамдани, в виде нечеткого множества второго уровня [14], [21]:

$$S_{о6f} = \left\{ \frac{S_f(x_{fi})}{x_{fi}} \right\}, i = \overline{1, m}, \quad (3)$$

$$\text{где } S_f(x_{fi}) = \left\{ \left(\frac{\mu_{A_{ij}}(x_{fi})}{T_j^i} \right) \right\}, j = \overline{1, k}.$$

Например, нечеткая ситуация состояние СЭ, при заданных значениях функциональных признаков «Техническое состояние СЭ (ТС СЭ)», «Состояние трафика (TR)» может быть представлено в виде нечеткой ситуации, имеющей вид:

$$S_{о6ш} = \left\{ S_{о6f1} = \frac{0,9}{\text{ТС СЭ : «нормальное»}}; S_{о6f2} = \frac{0,75}{\text{TR : «допустимое»}} \right\}. \quad (4)$$

Значение общей нечеткой ситуации состояния СЭ будет иметь вид: $S_{о6ш} = \text{«допустимое»}$. При этом, в свою очередь, значения частных нечетких ситуаций состояния СЭ могут иметь вид:

$$S_{о6f1} = \left\{ \frac{0,9}{\text{ПО СЭ : «нормальное»}}, \frac{0,83}{\text{АПС СЭ : «нормальное»}}, \frac{0,75}{\text{ИНТЕРФЕЙСЫ СЭ : «нормальное»}} \right\}. \quad (5)$$

где ПО СЭ — программное обеспечение СЭ; АПС СЭ — аппаратные средства СЭ. Нечеткая ситуация «Состояние трафика (TR)» может описываться в виде

$$S_{о6f2} = \left\{ \frac{0,9}{\hat{m}(i) : \text{«нормальное»}}, \frac{0,83}{\hat{\sigma}(i) : \text{«допустимое»}}, \frac{0,75}{\hat{k}_v(i) : \text{«допустимое»}} \right\}. \quad (6)$$

где $\hat{m}(i)$, $\hat{\sigma}(i)$, $\hat{k}_v(i)$ — текущие значения оценок математического ожидания интенсивности трафика на выбранном интерфейсе СЭ, среднеквадратического отклонения и коэффициента вариации со-

ответственно. Состояния каждой функциональной группы характеризуются терминами: «нормальное», «допустимое», «недопустимое».

Таким образом, на входы модуля оценки нечеткой ситуации состояния СЭ поступает совокупность признаков $\{x_{ij}\}$ каждой контролируемой функциональной группы. Состояния функциональных групп определяют техническое и функциональное состояния СЭ. На выходе иерархического слоя формируется упорядоченный набор оценок нечетких ситуаций $\{S_f(i)\}$ состояния СЭ для каждой функциональной группы. Процедура агрегирования полученных оценок происходит на следующем уровне иерархии нечеткой ситуационной сети [14]. В представленной структуре БФС ИА число иерархических уровней определяется в соответствии с решением конкретной задачи при проектировании ИА.

Обобщенную математическую модель управления КМСС ВБ можно представить в виде [11], [12], [15]:

$$Z = \bigcup_{i \neq j}^N f_{ij}(\varphi_{ij}(X_{ij}, U_{ij})), \quad (7)$$

где $X_{ij} = \{x_{ij} / \mu(x_{ij})\}$ — множество нечетких признаков состояния j -го уровня управления КМСС ВБ; $U_{ij} = \{u_{ij} / \mu(u_{ij})\}$ — нечеткие управляющие воздействия j -го уровня управления; φ_{ij} — оператор агрегирования информации сетевого состояния или состояния СЭ; f_{ij} — оператор оптимизации i -го уровня управления; $Z_{ij} = \{z_{ij}\}$ — множество целевых функций определенного уровня управления [11, 12].

Для каждого уровня модель управления КМСС ВБ Z может быть представлена либо как совокупность критериев оптимизации, либо как совокупность их сверток [12]. Реализуемый БФС ИА оператор управления представляет собой совокупность процедур решений набора оптимизационных задач [12], [19]. Для получения решения необходимо найти рациональное значение вектора целевой функции, когда коэффициенты критериев оптимальности, а также граничные значения всех или некоторых векторов ограничений заданы нечеткими множествами. Постановка такой задачи в общем виде может быть представлена [12], [19] в следующем виде:

$$\bar{Z}_r(X^*) = \text{extr} \bar{Z}_r(X), \quad r = \overline{1, R}, \quad (8)$$

при ограничениях

$$W = \{X / H_k \leq x_j, \dots, j = \overline{1, n}, k = \overline{1, m}\}. \quad (9)$$

Постановка задачи многокритериальной нечеткой оптимизации в общем виде может иметь следующий вид. Альтернативе Alt_k ставится в соответствие некоторое множество C_r , определяющее степень эффективности как для каждой из целевых функций, так и для всего множества критериев оптимальности в данной альтернативе. Каждое множество C_r может быть задано своей функцией принадлежности в виде [12]:

$$\mu_i[f_i(C_r / Alt_k)] := f_i(C_r / Alt_k) \rightarrow [0, 1]. \quad (10)$$

Критерием решения задач нечеткой многокритериальной оптимизации выбирается критерий Беллмана – Заде [11], [12], [18], суть которого заключается в том, что если в модели принятия решений существуют множества значений векторов локальных целевых функций $Z = F(X)$ и решений G , то эффективным решением (например, Парето-оптимальным решением) D является нечеткое множество, которое принадлежит пересечению этих двух множеств, т. е.

$$D \in \left(\bigcap_{i=1}^n Z_i \right) \cap \left(\bigcap_{j=1}^m G_j \right). \quad (11)$$

Тогда альтернатива, удовлетворяющая условию:

$$\mu_i[F(C_r / Alt^*)] = \text{extr} \mu_D[F / Alt_r], \quad (12)$$

является оптимальным решением оптимизационной задачи.

Общая структура алгоритма, реализующего предложенные принципы поддержки принятия решений для управления QoS в КМСС ВБ, приведена на рис. 5.

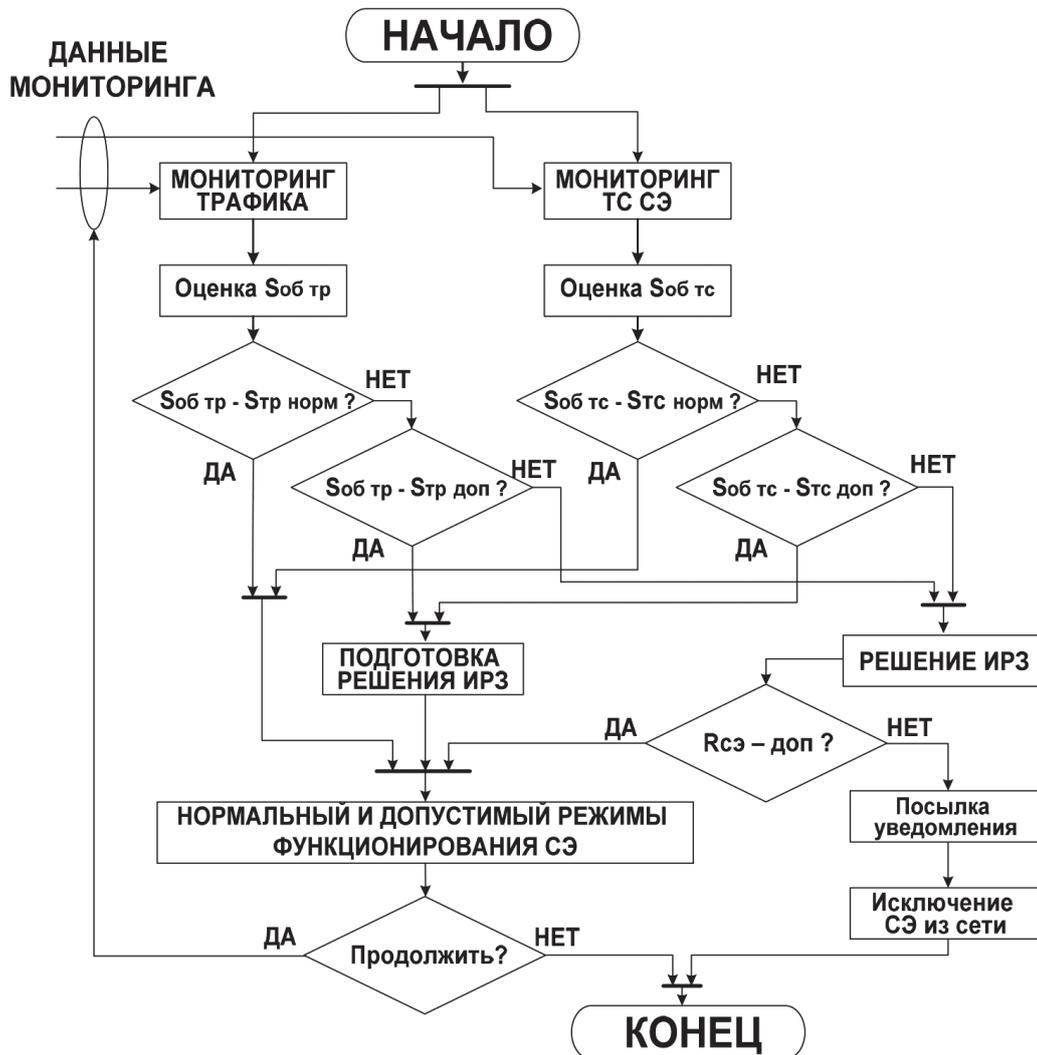


Рис. 5. Структура алгоритма поддержки принятия решений для управления QoS в КМСС ВБ:

$S_{об\ тс}$ — нечеткая ситуация состояния трафика СЭ;
 $S_{об\ тс}$ — нечеткая ситуация технического состояния СЭ; $R_{сэ}$ — ресурс СЭ

Результаты (Results)

В численном эксперименте оценивались характеристики и параметры СЭ с помощью ИА, оказывающие влияние на характеристики QoS. В качестве примера на рис. 6 представлены функции принадлежности системы нечеткого вывода для оценки состояния электрических параметров СЭ функциональной группы «Аппаратные средства СЭ». Анализ требуемой производительности процессорного модуля ИА показал, что для оценки параметров QoS одного СЭ достаточно иметь его производительность, равную 1,8–2,2 Гфл. В этом случае время принятия управленческого решения по управлению QoS СЭ составит приблизительно $15\text{--}70 \times 10^{-6}$ с (15–70 мкс), что является достаточным значением для управления СЭ в реальном масштабе времени. Точностные характеристики алгоритма оценки состояния СЭ определяются характеристиками первичных сенсоров. Все выполненные эксперименты численного моделирования показали высокую устойчивость функционирования модуля оценки нечеткой ситуации. Недостоверных и ошибочных оценок в ходе эксперимента зафиксировано не было.

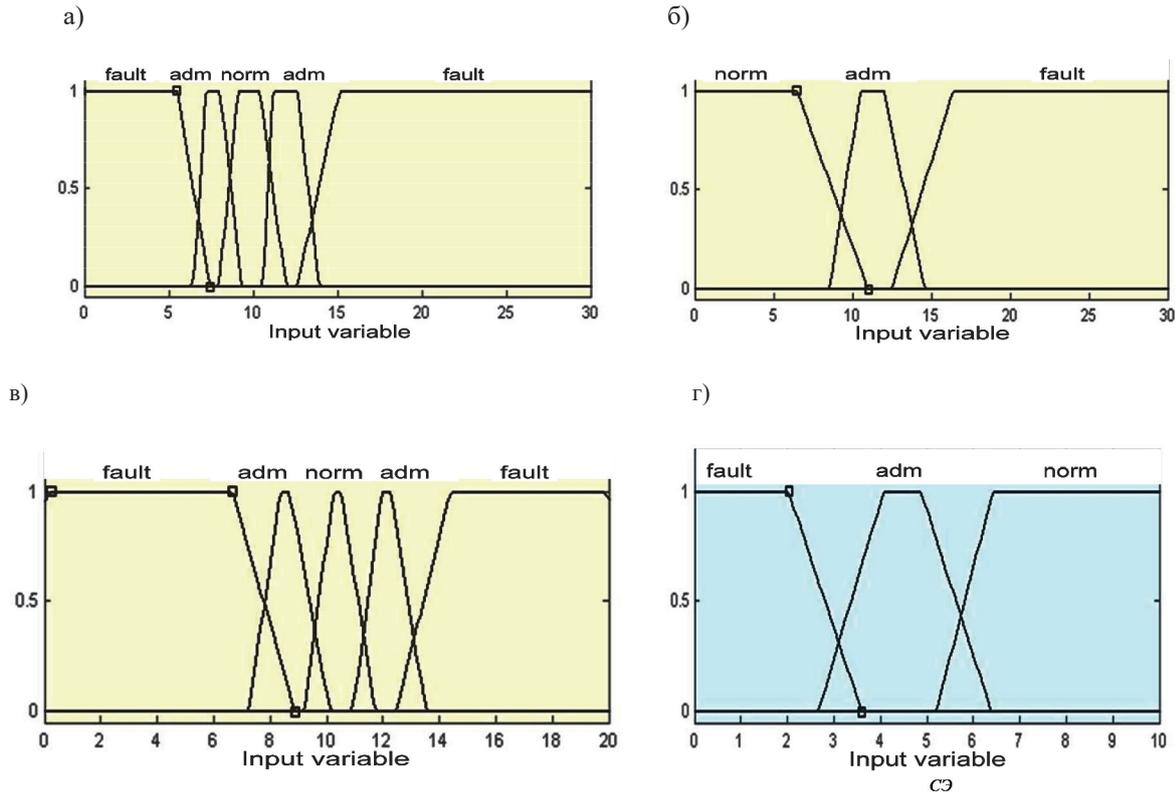


Рис. 6. Входные и выходные функции принадлежности ИА электрических параметров:
 а — ФП параметра «электропитание»; б — ФП параметра «затухание»;
 в — ФП параметра «сопротивление интерфейсов»; г — ФП значения нечеткой ситуации $S_{\text{АПС СЭ}}$

Точностные характеристики алгоритмов оценки параметров интенсивности трафика подробно исследованы в работе [20]. Показано, что средняя относительная погрешность оценки параметров трафика КМСС ВБ для интенсивности трафика, имеющей распределение Парето, не превышает 9,6 %, в остальных случаях эта погрешность не превосходит 5–7 %.

Заключение (Conclusion)

Полученные в работе результаты численного моделирования алгоритмов оперативного оценивания состояния СЭ для обеспечения требуемого уровня QoS в КМСС ВБ показали возможность его функционирования в режиме реального времени. Абсолютная задержка принятия решения составляет не более нескольких десятков микросекунд. Относительные погрешности значений оценок параметров технического и функционального состояний СЭ и параметров сетевого трафика, оказывающих влияние на уровень QoS, по величине не превосходят значения 10 %. Эти показатели позволяют реализовать оперативное управление СЭ и сетевым доменом в целом.

Метод и алгоритмы оперативного управления параметрами QoS, предложенные в работе, могут функционировать в моделях интегрированных и дифференцированных услуг обеспечения качества услуг связи в КМСС ВБ.

Достоинством предложенного подхода является то, что ИА КМСС ВБ адаптируются к сетевой структуре и топологии, адаптивно подстраиваясь к изменениям в конфигурации сетевого оборудования. ИА распределены по всем СЭ в сетевых доменах КМСС ВБ, что позволяет рационально разместить вычислительные ресурсы, а также существенно повысить надежность функционирования АСУС.

Выполненный анализ полученных результатов показал возможность реализации данного метода как на универсальных процессорах в виде специального программного обеспечения, так и на основе технологии FPGA в виде аппаратно-программных средств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ITU-T Recommendation G.1000. Communications quality of service: A framework and definitions. — Switzerland, Geneva: ITU, 2002. — 10 p.
2. Назаров А. Н. Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения / А. Н. Назаров, К. И. Сычев. — Красноярск: Изд-во ООО «Поликом», 2010. — 389 с.
3. Поспелов Д. А. Ситуационное управление: теория и практика / Д. А. Поспелов. — М: Наука, 1986. — 288 с.
4. Агеев С. А. Интеллектуальная распределенная система управления рисками информационной безопасности в защищенных мультисервисных сетях специального назначения / С. А. Агеев / Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. — 2015. — № 3. — С. 26–37.
5. ITU-T Recommendation Y.2001. General overview of NGN. — Switzerland, Geneva: ITU, 2005. — 12 p.
6. ITU-T Recommendation Y.1540 (03/2011). Internet protocol data communication service – IP packet transfer and availability performance parameters. — Switzerland, Geneva: ITU, 2011. — 46 p.
7. ITU-T Recommendation Y.1541 (12/2011). Network performance objectives for IP – based services. — Switzerland, Geneva: ITU, 2012. — 60 p.
8. ITU-T Recommendation Y.1221 (06/2010). Traffic control and congestion control in IP – based networks. — Switzerland, Geneva: ITU, 2010. — 34 p.
9. Maeda Y. QoS standards for ip-based networks / Y. Maeda // IEEE Communications Magazine. — 2003. — Vol. 41. — Is. 6. — Pp. 80–80. DOI: 10.1109/MCOM.2003.1204751.
10. ITU-T Recommendation M.3010 (02/2000). Principles for a telecommunications management network. — Switzerland, Geneva: ITU, 2000. — 38 p.
11. Агеев С. А. Метод оперативного оценивания состояния сетевых элементов для обеспечения качества услуг в корпоративных высокоскоростных мультисервисных сетях связи / С. А. Агеев, Н. С. Агеева, В. В. Каретников, А. А. Привалов // Автоматизация процессов управления. — 2020. — № 2 (60). — С. 25–35. DOI: 10.35752/1991-2927-2020-2-60-25-35.
12. Зак Ю. А. Принятие многокритериальных решений / Ю. А. Зак. — М.: Экономика, 2011. — 236 с.
13. Мелихов А. Н. Ситуационно-советующие системы с нечеткой логикой / А. Н. Мелихов, Л. С. Бернштейн, С. Н. Коровин. — М: Наука, 1990. — 272 с.
14. Ageev S. A. Method of monitoring of technical condition of multiservice communication network on the basis of hierarchical fuzzy inference / S. A. Ageev, A. A. Gladkikh, D. V. Mishin, A. A. Privalov // Fuzzy Technologies in the Industry — FTI 2018 Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference. — Ulyanovsk: USTU, 2018. — Pp. 211–221.
15. Борисов В. В. Нечеткие модели и сети / В. В. Борисов, В. В. Круглов, А. С. Федулов. — 2-е издание, стереотипное. — М.: горячая линия – Телеком, 2012. — 284 с.
16. Mamdani E. H. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller / E. H. Mamdani, S. Assilian // International journal of man-machine studies. — 1975. — Vol. 7. — Is. 1. — Pp. 1–13. DOI: 10.1016/S0020-7373(75)80002-2.
17. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление: пер. с англ. / А. Пегат. — М.: БИНОМ Лаборатория знаний, 2013. — 798 с.
18. Беллман Р. Принятие решений в расплывчатых условиях / Р. Беллман, Л. Заде // В сб.: Вопросы анализа и процедуры принятия решений. — М: Мир, 1976. — С. 172–215.
19. Зайченко Ю. П. Исследование операций: Нечеткая оптимизация / Ю. П. Зайченко. — К.: Выща. шк., 1991. — 191 с.
20. Агеев С. А. Адаптивный метод обнаружений аномалий трафика в высокоскоростных мультисервисных сетях связи / С. А. Агеев А. А. Гладких, В. И. Курносоев, А. А. Привалов // Научные исследования в космических исследованиях Земли. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 4–13. DOI: 10.24411/2409-5419-2018-10282.

REFERENCES

1. ITU-T Recommendation G.1000. Communications quality of service: A framework and definitions. Switzerland, Geneva: ITU, 2002.

2. Nazarov, A. N., and K. I. Sychev. *Modeli i metody rascheta pokazatelei kachestva funktsionirovaniya uzlovogo oborudovaniya i strukturno-setevykh parametrov setei svyazi sleduyushchego pokoleniya*. Krasnoyarsk: Izd-vo OOO «Polikom», 2010.
3. Pospelov, D. A. *Situatsionnoe upravlenie: teoriya i praktika*. M: Nauka, 1986.
4. Ageev, S. A. “Intelligent distributed information security risk management system for protected multiservice networks of a special purpose.” *Information Security Problems. Computer Systems* 3 (2015): 26–37.
5. *ITU-T Recommendation Y.2001. General overview of NGN*. Switzerland, Geneva: ITU, 2005.
6. *ITU-T Recommendation Y.1540 (03/2011). Internet protocol data communication service — IP packet transfer and availability performance parameters*. Switzerland, Geneva: ITU, 2011.
7. *ITU-T Recommendation Y.1541 (12/2011). Network performance objectives for IP-based services*. Switzerland, Geneva: ITU, 2012.
8. *ITU-T Recommendation Y.1221 (06/2010). Traffic control and congestion control in IP-based networks*. Switzerland, Geneva: ITU, 2010.
9. Maeda, Yoichi. “QoS standards for ip-based networks.” *IEEE Communications Magazine* 41.6 (2003): 80–80. DOI: 10.1109/MCOM.2003.1204751.
10. *ITU-T Recommendation M.3010 (02/2000). Principles for a telecommunications management network*. Switzerland, Geneva: ITU, 2000.
11. Ageev, Sergei Aleksandrovich, Nina Sergeevna Ageeva, Vladimir Vladimirovich Karetnikov, and Andrei Andreevich Privalov. “The real-time assessing method for the state of network elements to provide for quality parameters in corporate high-speed multiservice communication networks.” *Automation of Control Processes* 2(60) (2020): 25–35.
12. Zak, Yu. A. *Prinyatie mnogokriterial’nykh reshenii*. M.: Ekonomika, 2011.
13. Melikhov, A. N., L. S. Bernshtein, and S.N. Korovin. *Situatsionno-sovetuyushchie sistemy s nechetkoi logikoi*. M: Nauka, 1990.
14. Ageev, S. A., A. A. Gladkikh, D. V. Mishin, and A.A. Privalov. “Method of monitoring of technical condition of multiservice communication network on the basis of hierarchical fuzzy inference.” *Fuzzy Technologies in the Industry — FTI 2018 Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference*. Ulyanovsk: USTU, 2018. 211–221.
15. Borisov, V. V., V. V. Kruglov, and A. S. Fedulov. *Nechetkie modeli i seti*. 2nd edition. M.: Goryachaya Liniya – Telekom, 2012.
16. Mamdani, Ebrahim H., and Sedrak Assilian. “An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller.” *International journal of man-machine studies* 7.1 (1975): 1–13. DOI: 10.1016/S0020-7373(75)80002-2.
17. Pegat, A. *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie*. M.: BINOM Laboratoriya znaniy, 2013.
18. Bellman, R., and L. Zade. “Prinyatie reshenii v rasplyvchatykh usloviyakh.” *Voprosy analiza i protsedury prinyatiya reshenii*. M: Mir, 1976. 172–215.
19. Zaichenko, Yu. P. *Issledovanie operatsii: Nechetkaya optimizatsiya: Uchebn. posobie*. K.: Vyshcha. shk., 1991.
20. Ageev, S. A., A. A. Gladkikh, V. I. Kurnosov, and A. A. Privalov. “Adaptive method of detecting traffic anomalies in high-speed multiservice communication networks.” *H&ES Research* 11.5 (2019): 4–13.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каретников Владимир Владимирович —
 доктор технических наук, доцент
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: kaf_svvvp@gumrf.ru,
 spguwc-karetnikov@yandex.ru
Агеева Нина Сергеевна —
 научный сотрудник
 Военная академия связи
 194064, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 Тихорецкий проспект, 3
 e-mail: nineIlia@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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: kaf_svvvp@gumrf.ru,
 spguwc-karetnikov@yandex.ru
Ageeva, Nina S. —
 Researcher
 Military Telecommunications Academy
 3 Tikhoretsky Av., St. Petersburg, 194064, Russian
 Federation
 e-mail: nineIlia@yandex.ru

Привалов Андрей Андреевич —
доктор военных наук, профессор
ФГБОУ ВО «Петербургский государственный
университет путей сообщения Императора
Александра I»
190031, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Московский пр., 9
e-mail: apivalov@inbox.ru

Privalov, Andrey A. —
Dr. of Military Sciences, professor
Emperor Alexander I
St. Petersburg State
Transport University
9 Moskovsky Av., St. Petersburg, 190031,
Russian Federation
e-mail: apivalov@inbox.ru

*Статья поступила в редакцию 6 сентября 2020 г.
Received: September 6, 2020.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-853-860

CONTAINER TERMINAL STACK MANAGEMENT STRATEGY

A. L. Kuznetsov¹, A. Z. Borevich², A. A. Radchenko¹

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

² — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russian Federation

The problem of managing the stack of a container terminal is the topic of many domestic and foreign studies. Despite this, the optimal solution in the form of a unified and justified operational strategy has not been found yet. In this paper, one of the particular issues is explored, namely the influence of allocation of the stack height over slots relative to the average value. The relevance of this issue is explained by the fact that the size of the warehouse of a container terminal is traditionally designed to store a certain maximum number of containers. The practice of modern container terminals shows that most of the time the actual storage volume in the warehouse is within 50–70 % of the maximum capacity of a one-time location of containers at the terminal, and approaching 80 % occupancy is considered an alarming operational situation. But in case of incomplete occupancy of the container site, the issue about the optimal strategy for forming the stacks, which minimizes the laboriousness of processing the cargo traffic passing through the warehouse, arises. The parameter characterizing the indicated laboriousness is the average number of movements required to retrieve a container from a stack. In the paper, a storage strategy, which ensures the minimum laboriousness of selecting containers for a given storage volume, is analytically substantiated, as a result, it becomes possible to give reasonable recommendations on the containers arrangement in a stack when the terminal is not fully loaded. An analytical solution to the problem, including quantities such as storage height, number of movements and the distribution of containers by slots, is firstly considered. Further, the use of the statistical modeling method, which makes it possible to take into account the features caused by the scatter of physical and technological parameters, is substantiated and described. A description of using the simulation modeling methods that confirm the practical significance and adequacy of the proposed approach is considered at the end.

Keywords: terminal, freight traffic, containers, warehousing, laboriousness, mathematical modeling, statistical modeling, slot, height of the stack.

For citation:

Kuznetsov, Aleksandr L., Albert Z. Borevich, and Anna A. Radchenko. “Container terminal stack management strategy.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.5 (2020): 853–860. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-853-860.

УДК 656.615

СТРАТЕГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ШТАБЕЛЕМ КОНТЕЙНЕРНОГО ТЕРМИНАЛА

А. Л. Кузнецов¹, А. З. Боревич², А. А. Радченко¹

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

² — Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Отмечается, что проблема управления штабелем контейнерного терминала является темой многих отечественных и зарубежных исследований, но несмотря на это, оптимальное решение в виде унифицированной и обоснованной операционной стратегии до сих пор не найдено. В данной работе исследуется один из частных вопросов, а именно влияние неравномерности распределения высоты штабеля по слотам относительно среднего значения. Актуальность этого вопроса объясняется тем, что размер склада контейнерного терминала традиционно рассчитан для хранения некоторого максимального количества контейнеров. Практика работы современных контейнерных терминалов показывает, что большую часть

времени реальный объем хранения на складе составляет 50–70 % от предельной емкости единовременного нахождения контейнеров на терминале, а приближение занятости к 80 % считается тревожной операционной ситуацией. Таким образом, при неполной занятости контейнерной площадки возникает вопрос об оптимальной стратегии формирования штабелей, минимизирующей трудоемкость обработки проходящего через склад грузопотока. Рассмотрен один из основных параметров, характеризующих указанную трудоемкость — среднее количество движений, необходимых для выборки контейнера из штабеля. Аналитически обоснована стратегия хранения, обеспечивающая минимальную трудоемкость выборки контейнеров при заданном объеме хранения, в результате чего появляется возможность дать мотивированные рекомендации по расположению контейнеров в штабеле при неполной загрузке терминала. Исследование начинается с рассмотрения аналитического решения задачи, включающей такие величины, как высота складирования, число движений и характер распределения контейнеров по слотам. Обосновано и описано использование метода статистического моделирования, позволяющего учесть особенности, вызванные разбросом физических и технологических параметров. Приведено описание использования методов имитационного моделирования, подтверждающих практическую значимость и адекватность предлагаемого подхода.

Ключевые слова: контейнерный терминал, трудоемкость выборки, математическое моделирование, операционная высота складирования.

Для цитирования:

Кузнецов А. Л. Стратегия управления штабелем контейнерного терминала / А. Л. Кузнецов, А. З. Борович, А. А. Радченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 5. — С. 853–860. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-853-860.

Введение (Introduction)

Современный контейнерный терминал должен эффективно обеспечивать выполнение комплекса складских и транспортно-экспедиционных услуг. Его задача состоит в объединении транспортного процесса, грузопереработки и временного складирования грузов при передаче их с магистрального на автомобильный и другие виды транспорта. Кроме того, терминалы должны быть приспособлены для прогрессивных методов переработки и хранения грузов, иметь развитое, обеспеченное новейшими цифровыми технологиями складское хозяйство, что, в свою очередь, позволит гарантировать экономичность, сохранность и повысить качество обслуживания грузовладельцев [1]–[3].

Новым импульсом к изучению научно-технических проблем контейнерных терминалов послужило развитие информационных технологий, в частности методов имитационного моделирования. В научных публикациях имеется описание моделей реальных и абстрактных терминалов, в которые встроены новейшие сложные механизмы, отражающие специфические особенности модулируемого объекта и избранные операционные стратегии [4], [5]. В то же время практическая деятельность операторов и проектировщиков контейнерных терминалов требует выявления базовых математических зависимостей, которые могут быть использованы для проектирования морских и сухих портов, оценки эффективности работы терминала, планирования и анализа оперативной деятельности, а также разработки ключевых показателей эффективности.

В теории и практике контейнерных терминалов одним из ключевых показателей является *средняя операционная высота складирования*, которая определяет трудоемкость выборки контейнеров [6]. В работах [7]–[10] рассмотрены математические зависимости среднего количества движений, необходимых для выборки одного контейнера в зависимости от средней высоты складирования. В то же время особенности технологии выполнения перегрузочных операций с контейнерами обуславливают значительные разбросы высот складирования в отдельных секциях штабеля. В результате одна и та же средняя высота складирования может обеспечиваться за счет различных вариантов размещения контейнеров, характеризующихся различными значениями высоты наземных слотов штабеля (рис. 1).

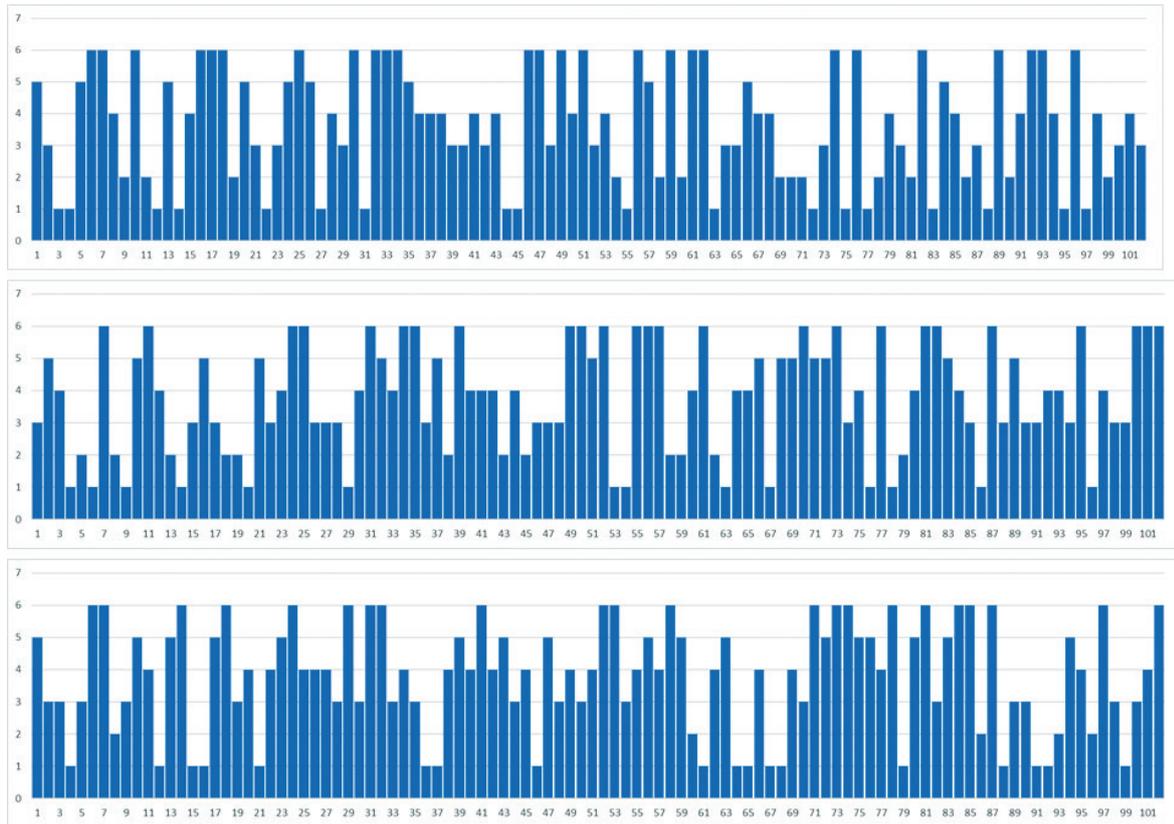


Рис. 1. Пример различных профилей штабеля с одинаковой средней высотой

Основными задачами данного исследования являются:

- математически доказать существенность влияния разбросов высоты складирования на трудоемкость выборки;
- определить зависимость среднего количества движений необходимых для выборки одного контейнера от вариации высот складирования контейнеров в отдельных секциях;
- оценить распределение среднего количества движений при различных формах контейнерного штабеля методами имитационного моделирования.

Методы и материалы (Methods and Materials)

1. *Аналитическое решение задачи.* При решении поставленных задач считается, что общее количество контейнеров на терминале, или операционный объем единовременного хранения, теми или иными методами определен. Пусть это заданное количество контейнеров N хранится над множеством наземных слотов общим числом S , тем самым формируя среднюю высоту складирования $h = \frac{N}{S}$. При этом над каждым отдельным слотом s складировается столбец с индивидуальным значением высоты h_s , так что $N = \sum_{s=1}^S h_s$. В каждом столбце s среднее число движений для выборки одного контейнера составляет величину $\frac{1+h_s}{2}$, а общее число движений для выборки всех контейнеров столбца — $n_s = h_s \frac{1+h_s}{2}$.

Общее количество движений, требуемых для выборки полного объема хранения контейнеров во всех столбцах, составляет, таким образом, величину $n = \sum_{s=1}^S h_s \frac{1+h_s}{2}$. Отсюда среднее число движений на контейнер определяется в виде

$$\begin{aligned}
 m_n &= \frac{n}{N} = \frac{\sum_{s=1}^S h_s \frac{1+h_s}{2}}{N} = \frac{1}{2} \frac{\sum_{s=1}^S (h_s(1+h_s))}{N} = \frac{1}{2} \frac{\sum_{s=1}^S (h_s + h_s^2)}{\sum_{s=1}^S h_s} = \\
 &= \frac{1}{2} \left(\frac{\sum_{s=1}^S h_s}{\sum_{s=1}^S h_s} + \frac{\sum_{s=1}^S (h_s^2)}{\sum_{s=1}^S h_s} \right) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\sum_{s=1}^S (h_s^2)}{\sum_{s=1}^S h_s} \right) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\sum_{s=1}^S (h_s^2)}{N} \right). \quad (1)
 \end{aligned}$$

Если контейнеры распределены по слотам равномерно, т. е. высота складирования одинакова над всеми слотами ($h_s = h$), то среднее число движений, необходимых для выборки контейнера из такого склада, составляет

$$m_0 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\sum_{s=1}^S (h^2)}{\sum_{s=1}^S h} \right) = \frac{1+h}{2}. \quad (2)$$

Покажем, что равномерное заполнение штабеля $h_s = h$ обеспечивает искомое минимальное количество движений для выборки. Для этого рассмотрим разность $m_n - m_0$ и установим, что она всегда неотрицательна:

$$\begin{aligned}
 &\frac{1}{2} \left(1 + \frac{\sum_{s=1}^S (h_s^2)}{\sum_{s=1}^S h_s} \right) - \frac{1+h}{2}; \\
 &\frac{\sum_{s=1}^S (h_s^2)}{\sum_{s=1}^S h_s} - h; \\
 &\frac{\sum_{s=1}^S (h_s^2)}{\sum_{s=1}^S h_s} - \frac{H}{S}; \\
 &\frac{\sum_{s=1}^S (h_s^2)}{\sum_{s=1}^S h_s} - \frac{\sum_{s=1}^S h_s}{S}; \\
 &S \sum_{s=1}^S (h_s^2) - \left(\sum_{s=1}^S h_s \right)^2. \quad (3)
 \end{aligned}$$

Заметим, что

$$\left(\sum_{i=1}^n a_i \right)^2 = \sum_{i=1}^n a_i^2 + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j>i}^n a_i a_j. \quad (4)$$

Откуда получим:

$$S \sum_{s=1}^S (h_s^2) - \sum_{s=1}^S (h_s^2) - 2 \sum_{i=1}^S \sum_{j>i}^S h_i h_j;$$

$$(S-1) \sum_{s=1}^S (h_s^2) - 2 \sum_{i=1}^S \sum_{j>i}^S h_i h_j ;$$

$$\sum_{i=1}^S \sum_{j>i}^S (h_i - h_j)^2 \geq 0. \quad (5)$$

Из приведенного условия (5) следует, что $m_N = m_o + \frac{\sum_{i=1}^S \sum_{j>i}^S (h_i - h_j)^2}{2NS}$. Иными словами, это означает, что поправка, показывающая увеличение среднего числа движений по сравнению с равномерным распределением, зависит от «разброса» значений высот. Это увеличение обусловлено тем, что превышающие средние значения высоты дают больший вклад из-за квадратичной зависимости разностей, чем это компенсируют их отклонения в меньшую сторону.

Равномерное размещение контейнеров по слотам одно, а вариантов распределения N по S слотам очень много, а именно C_{N+s-1}^{s-1} . Получить для них аналитические зависимости становится невозможным, поэтому оценку трудоемкости выборки приходится производить *методами статистического моделирования*.

2. Статистическое моделирование. Суть метода статистических испытаний в данном случае состоит в генерации распределения заданного числа контейнеров N по доступным на складе S слотам. Генерация распределения выполняется по методу обратной функции с заданным значением математического ожидания $\mu = h = \frac{N}{S}$ и варьируемым значением дисперсии (или среднеквадратичного отклонения $\sigma = \sqrt{\delta}$). Оценка каждого сгенерированного варианта такого распределения может быть выполнена в отношении трудоемкости выборки контейнера с помощью получен-

ной аналитической зависимости $m_n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\sum_{s=1}^S (h_s^2)}{N} \right)$.

В результате проведения статистически достоверного количества испытаний, для каждого варианта $\mu\sigma$ может быть построена гистограмма, характеризующая плотность распределения случайной величины — среднего числа движений на контейнер $n_{\mu\sigma}$. По данной гистограмме могут быть построены характеристические моменты распределения этой случайной величины, а именно ее среднее значение $M_{\mu\sigma}$ и дисперсия $\delta_{\mu\sigma}$. При одном и том же значении математического ожидания исходного распределения контейнеров по слотам μ обе эти величины будут зависеть от дисперсии δ . После проведения аналогичных серий статистических испытаний можно получить соответствующую зависимость в явном виде.

Результаты (Results)

На рис. 2 показаны результаты моделирования по методу статистических испытаний для математического ожидания (МО) с различной высотой складирования и характеристикой разброса, задаваемых средним квадратическим отклонением (СКО). Такие значения высот на практике не используются, и приведены здесь лишь для выявления действующих тенденций. На рис. 3 показаны результаты моделирования — гистограммы распределения среднего количества движений на контейнер (для распространенного варианта складирования со средней высотой яруса $h = 4$). Значения математического ожидания гистограмм, показанных на рис. 3 в виде функции от СКО исходного распределения высот, приведены на рис. 4.



Рис. 2. Зависимость среднего числа движений от разброса высоты складирования, $h = 10$

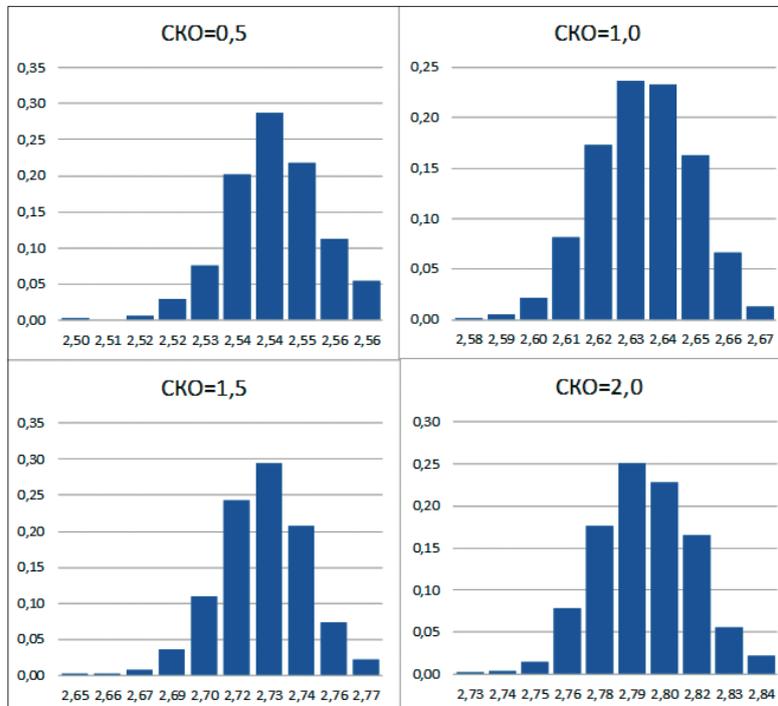


Рис. 3. Распределение количества движений в зависимости от разброса высоты складирования при средней высоте складирования, $h = 4$



Рис. 4. Значения математического ожидания гистограмм как функция от СКО исходного распределения высот

Из приведенных рис. 2–4 видно, что с ростом разброса высот складирования по слотам растет среднее количество движений, которое требуется для выборки из штабеля. Очевидно, что подобное имитационное моделирование можно выполнить для компонент, характеризующихся индивидуальными распределениями (МО и СКО).

Выводы (Conclusions)

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Аналитические расчеты и математическое моделирование являются дополняющими друг друга рабочими инструментами выявления важных закономерностей функционирования терминала.
2. Полученные с помощью этих инструментов оценки являются фундаментальными для построения операционных и финансовых показателей при проектировании и управлении контейнерными терминалами.
3. «Разброс» высоты складирования по слотам относительно среднего значения оказывает значительное влияние на трудоемкость технологических операций, повышая удельные затраты на перемещение контейнеров и увеличивая общие расходы терминала.
4. Имитационное моделирование необходимо внедрять в повседневную работу терминала, так как качество прогнозирования и оперативного планирования, необходимое для эффективного управления современным транспортным предприятием, не может быть получено иными способами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vis I. F. A. A comparative analysis of storage and retrieval equipment at a container terminal / I. F. A. Vis // International Journal of Production Economics. — 2006. — Vol. 103. — Is. 2. — Pp. 680–693. DOI: 10.1016/j.ijpe.2006.01.002.*
2. *Кириченко А. В. Морская контейнерная транспортно-технологическая система: монография / А. В. Кириченко [и др.]; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. А. В. Кириченко. — СПб.: Изд-во МАНЭБ, 2017. — 412 с.*
3. *Wiese J. A survey of container terminal characteristics and equipment types / J. Wiese, N. Klierer, L. Suhl // Paderborn: Decision Support & Operations Research Lab, Paderborn University. — 2009. — Working Paper 0901.*
4. *Sanen Y. A. Intelligent stacking as way out of congested yards? part 2 / Y. A. Sanen, R. Dekker // Port Technol Int 2007. — 2007. — Vol. 32. — Pp. 80–85.*
5. *Borgman B. Online rules for container stacking / B. Borgman, E. van Asperen, R. Dekker // OR spectrum. — 2010. — Vol. 32. — Is. 3. — Pp. 687–716. DOI: 10.1007/s00291-010-0205-4.*
6. *Zhen L. A review on yard management in container terminals / L. Zhen, X. Jiang, L.H. Lee, E. P. Chew // Industrial Engineering & Management Systems. — 2013. — Vol. 12. — No. 4. — Pp. 289–305. DOI: 10.7232/iems.2013.12.4.289.*
7. *Кузнецов А. Л. Анализ оптимизационных стратегий складирования контейнеров / А. Л. Кузнецов, А. Д. Семенов, А. З. Борович // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 803–812. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-803-812.*
8. *Кузнецов А. Л. Имитационное моделирование как инструмент расчета наземных контейнерных терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. С. Ткаченко, Г. Б. Попов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2018. — № 1. — С. 100–108. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-1-100-108.*
9. *Кузнецов А. Л. Влияние технических ограничений перегрузочного оборудования на производительность операций / А. Л. Кузнецов, А. Д. Семенов, В. П. Левченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 417–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-417-429.*
10. *Gosasang V. Long-term container throughput forecast and equipment planning: the case of Bangkok Port / V. Gosasang, T. L. Yip, W. Chandraprakaikul // Maritime Business Review. — 2018. — Vol. 3. — No. 1. — Pp. 53–69. DOI: 10.1108/MABR-07-2017-0019.*

REFERENCES

1. Vis, Iris F. A. "A comparative analysis of storage and retrieval equipment at a container terminal." *International Journal of Production Economics* 103.2 (2006): 680–693. DOI: 10.1016/j.ijpe.2006.01.002
2. Kirichenko, A. V., et al. *Morskaya konteiner'naya transportno-tehnologicheskaya sistema: monografiya*. Edited by A. V. Kirichenko. SPb.: Izd-vo MANEB, 2017.
3. Wiese, Jörg, Natalia Kliewer, and Leena Suhl. "A survey of container terminal characteristics and equipment types." *Paderborn: Decision Support & Operations Research Lab, Paderborn University* (2009). Working Paper 0901.
4. Sanen, Y. A., and R. Dekker. "Intelligent stacking as way out of congested yards? Part 2." *Port Technology International* 32 (2007): 80–85.
5. Borgman, Bram, Eelco van Asperen, and Rommert Dekker. "Online rules for container stacking." *OR spectrum* 32.3 (2010): 687–716. DOI: 10.1007/s00291-010-0205-4.
6. Zhen, Lu, Xinjia Jiang, Loo Hay Lee, and Ek Peng Chew. "A review on yard management in container terminals." *Industrial Engineering & Management Systems* 12.4 (2013): 289–305. DOI: 10.7232/iems.2013.12.4.289.
7. Kuznetsov, Aleksandr L., Anton D. Semenov, and Albert Z. Borevich. "Analysis of optimization container stacking strategies." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 803–812. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-803-812.
8. Kuznetsov, Alexander L'vovich, Alexander Viktorovich Kirichenko, Andrei Stanislavovich Tkachenko, and German Borisovich Popov. "Simulation modelling as a dry cargo terminals' calculation tool." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2018): 100–108. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-1-100-108.
9. Kuznetsov, Aleksandr L., Anton D. Semenov, and Veronika P. Levchenko. "The influence of container handling equipment technical limitations on the operations productivity." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 417–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-417-429.
10. Gosasang, Veerachai, Tsz Leung Yip, and Watcharavee Chandraprakaikul. "Long-term container throughput forecast and equipment planning: the case of Bangkok Port." *Maritime Business Review* 3.1 (2018): 53–69. DOI: 10.1108/MABR-07-2017-0019.

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

Боревич Альберт Зенонович —
кандидат физико-математических наук, доцент
Санкт-Петербургский Политехнический
Университет Петра Великого
195251, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Политехническая, 29
e-mail: alikhborevich@mail.ru

Радченко Анна Александровна —
старший преподаватель
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_pgt@gumrf.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

Borevich, Albert Z. —
PhD, associate professor
Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic University
29 Politekhnicheskaya Str., St. Petersburg,
195251, Russian Federation
e-mail: alikhborevich@mail.ru

Radchenko, Anna A. —
Senior Lecturer
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_pgt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 9 октября 2020 г.

Received: October 9, 2020.

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-861-867

CONTAINER LINE ROUTE OPTIMIZATION BASED ON CARGO DISTRIBUTION BETWEEN PORTS AND HINTERLANDS

A. S. Malykhin

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

It is noted that in modern conditions in container liner transportation, the implementation of the shipping line is an important and complex task, the solution of which is associated with the serious financial risks. It is indicated that currently many container line companies, in addition to sea transportation, offer land transportation services. Accordingly, the need to optimize the operation of the line's marine services is supplemented by the need to work with land routes. When working with land logistics, it is necessary to take into account that the place of beginning and ending the cargo flows are not seaports, but land points that are located in the hinterland of each port. It is emphasized that each port has several land points associated with it. In this regard, a large number of route options appear. It is determined that with a high complexity of solving the problem, this problem belongs to the class of NP-complex problems and cannot be solved in an acceptable period of time by the methods of full search of values. A possible problem solution is heuristic programming based on the genetic algorithms. The existing method of finding the problem solution is discussed in the paper. A modification based on modifying the genetic Chimera algorithm by combining this algorithm with an ordered crossover is proposed. Depending on the need, optimization can be performed using one or more criteria. It is shown that the main criteria can be time or cargo turnover, as well as a combination of these two criteria. Performing optimization using different criteria within the same model is a convenient tool for a shipping line.

Keywords: container shipping company, heuristic algorithm, genetic algorithm.

For citation:

Malykhin, Aleksandr S. "Container line route optimization based on cargo distribution between ports and hinterlands." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.5 (2020): 861–867. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-861-867.

УДК 656.6

ОПТИМИЗАЦИЯ МАРШРУТА КОНТЕЙНЕРНОЙ ЛИНИИ НА ОСНОВЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГРУЗОВ МЕЖДУ ПОРТАМИ И ХИНТЕРЛЕНДАМИ

А. С. Малыхин

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

Отмечается, что в современных условиях в контейнерных линейных перевозках реализация работы судоходной линии является важной и сложной задачей, решение которой сопряжено с серьезными финансовыми рисками. Указывается, что в настоящее время многие контейнерные линейные компании, помимо морских перевозок, предлагают услуги по наземным перевозкам. Соответственно к необходимости оптимизации работы морских сервисов линии добавляется необходимость работы с сухопутными путями. При работе с наземной логистикой необходимо учитывать, что местом зарождения и угасания грузопотоков являются не морские порты, а наземные пункты, которые располагаются в хинтерленде каждого порта. Подчеркивается, что у каждого порта существуют несколько связанных с ним наземных пунктов. В связи с этим появляется большое количество вариантов маршрутов. Определено, что при высокой сложности решения задачи данная проблема относится к классу NP-сложных задач и не может быть решена за приемлемый промежуток времени методами полного перебора значений. Возможным вариантом решения задачи является эвристическое программирование, которое основано на генетических алгоритмах. В статье обсуждается существующий метод поиска решения задачи. Предлагается модификация, которая основана на модификации алгоритма генетических химер путем комбинирования

этого алгоритма с упорядоченным кроссовером. В зависимости от потребности оптимизацию можно проводить с использованием одного или нескольких критериев. Приведено, что основными критериями могут являться время или грузооборот, а также комбинирование этих двух критериев. Проведение оптимизации с помощью разных критериев в рамках одной модели является удобным инструментом для судоходной линии.

Ключевые слова: контейнерная судоходная компания, эвристический алгоритм, генетический алгоритм.

Для цитирования:

Малыхин А. С. Оптимизация маршрута контейнерной линии на основе распределения грузов между портами и хинтерлендами / А. С. Малыхин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 5. — С. 861–867. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-861-867.

Введение (Introduction)

Оптимизация маршрута — это процесс определения кратчайших возможных маршрутов для достижения места назначения. Эта методология завоевала популярность в транспортно-логистической отрасли. Ее применение приводит к сокращению времени, затрачиваемого на перевозку, и в то же время к уменьшению затрат, понесенных в процессе перевозки. Вопрос оптимизации маршрутов движения судов в морской отрасли является хорошо изученным. Существует большое количество устоявшихся маршрутов и логистических схем, используемых в индустрии. Различные эвристические способы оптимизации положительно зарекомендовали себя в вопросе оптимизации только морских маршрутов. Тем не менее вопросы, касающиеся работы судоходных линий, остаются по-прежнему актуальными. Морские перевозчики интенсивнее начинают заниматься наземной логистикой, предоставляя большее количество услуг своим клиентам. Недостаточно изученным является вопрос создания судоходных линий при условии распределения контейнерных грузов между морскими портами для доставки грузов в их хинтерленды.

Безошибочная разработка и реализация работы контейнерной судоходной линии в современных условиях монополизации рынка линейных контейнерных перевозок [1], [2], с учетом высокого уровня постоянных отраслевых издержек [3] является серьезной задачей, связанной с большим уровнем финансовых рисков и значительным количеством вероятностных факторов. Для снижения риска принятия неверных решений на уровне выбора маршрута линейных судов необходима их детальная проработка.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Критерием оптимальности маршрута перевозок контейнеров между морскими портами может выступать одна из трех величин. Во-первых, это может быть время, затрачиваемое на круговой рейс (время выражает расходы судоходной линии на эксплуатацию флота, оплату труда экипажей судов и т. д.). Во-вторых, это может быть обслуживаемый грузооборот в контейнерах при прохождении судна по определенному маршруту (грузооборот выражает доход судоходной линии при организации перевозок по маршруту). Оптимизация только по каждому из этих двух указанных критериев является *однокритериальной оптимизацией*. В-третьих, это критерий, скомбинированный из первых двух, позволяющий провести многокритериальную оптимизацию и определить решение, оптимальное по Парето [4]. Все три варианта оптимизации могут быть использованы в модели как альтернативные.

Предлагаемая модель работает на основе базовых принципов объектно-ориентированного программирования. Все основные моделируемые понятия: наземные пункты, морские порты, контейнеры, сухопутные и морские пути сообщения, описываются классами. Во время выполнения программы создаются объекты этих классов, которые взаимодействуют между собой посредством отправки друг другу сообщений. В модели реализован такой базовый принцип объектно-ориентированного программирования, как наследование. Класс, описывающий морские порты, и класс, описывающий наземные пункты, наследуются от общего класса-родителя — территориального пункта. При разработке модели был использован язык программирования C# 7.0 и платформа .NET.

Типовая схема моделируемой сети распределения контейнеров между морскими портами и их хинтерлендами представлена на рис. 1, а. Данная схема имеет важное ограничение: каждый наземный пункт может быть связан только с одним морским портом. Данное ограничение, накладываемое на модель, связано с тем, что источниками зарождения и угасания грузопотоков в модели являются наземные пункты, расположенные в хинтерлендах морских портов. Сами по себе морские порты не могут быть источниками зарождения и угасания контейнерных грузопотоков, они выполняют лишь роль перевалочного пункта. Во время инициализации модели в каждом наземном пункте создается массив объектов, представляющих контейнеры. Каждый контейнер имеет четыре значимых поля (свойства): наземный пункт зарождения (Origin), наземный пункт назначения (Destination), ИМО-тип, порядковый номер (индекс) в рамках модели.

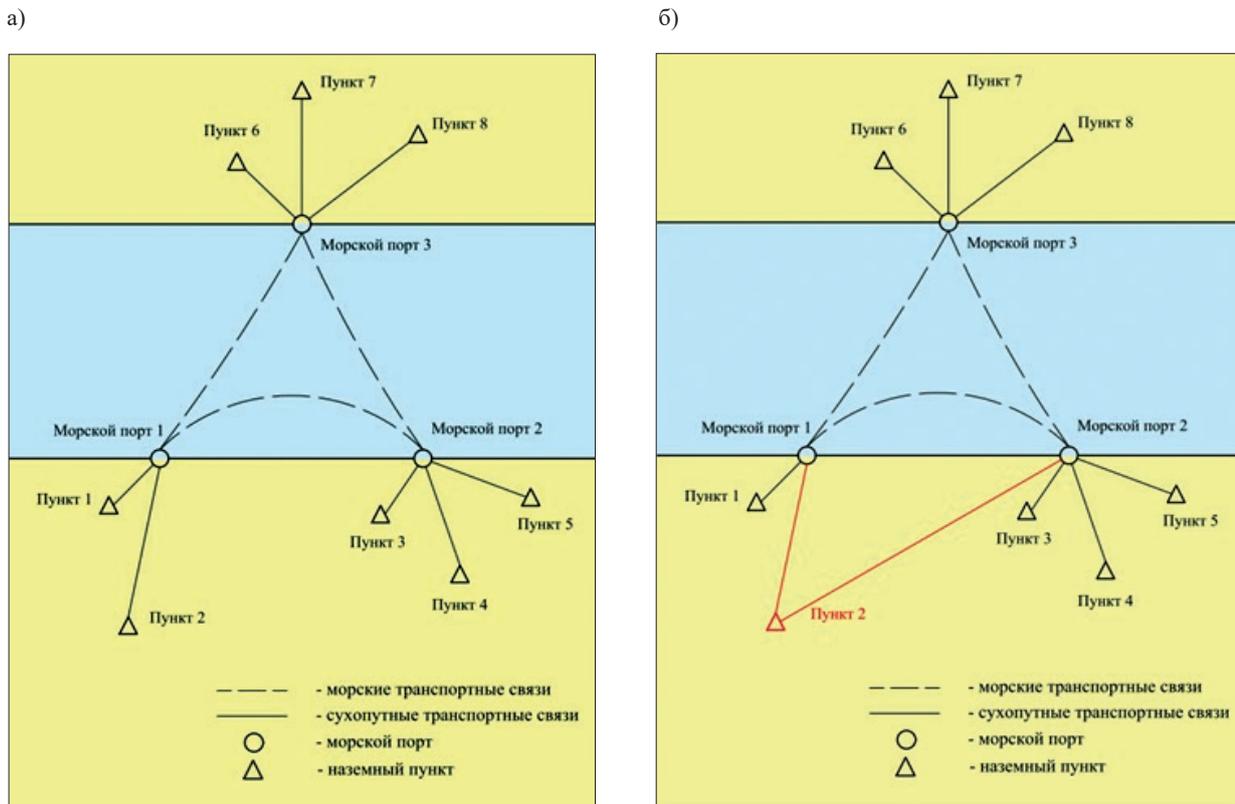


Рис. 1. Схемы транспортных путей между наземными пунктами и морскими портами:
 а — каждый пункт соединен только с одним портом;
 б — возможно соединение пунктов сразу с несколькими морскими портами

При создании массива контейнеров в наземном пункте задаются пункты назначения для каждого контейнера. Регистрация пункта назначения в каждом контейнере происходит случайным образом и ограничена только одним условием: пункт назначения не должен быть подключен к тому же порту, что и пункт отправления контейнера. Предполагается, что между пунктами зарождения грузопотоков, подключенными к одному и тому же морскому порту, существует сеть сухопутных путей сообщения, позволяющая доставку груза напрямую. Поэтому доставлять груз из одного наземного пункта в другой через этот порт, если оба наземных пункта связаны с одним и тем же морским портом, считается нерациональным априори.

В случае, если один наземный пункт связан с двумя морскими портами сухопутной связью, возникает проблема определения морского порта, в который необходимо доставить контейнер для того, чтобы он попал в свой конечный пункт назначения. Примером является схема взаимосвязей портов и наземных пунктов, приведенная на рис. 1, б. При рассмотрении схемы возникает вопрос: в случае зарождения контейнерного грузопотока из Пункта 7 в Пункт 2, через какой морской порт

должны быть доставлены контейнеры: через *Морской порт 1* или через *Морской порт 2*. В случае, если таких наземных пунктов, связанных с несколькими морскими портами, более одного-двух, то проблема выбора рационального пути через морские порты начинает оказывать значительное влияние на производительность модели. Предполагается, что подобная проблема может быть решена известными методами поиска пути на графе, поскольку сеть морских портов с хинтерлендами, по сути, представляет собой граф. К таким методам относятся алгоритмы поиска в ширину, в глубину, алгоритм Дейкстры [5], алгоритм «А звездочка», Jump Point Search и др. Однако выбор подходящего алгоритма обхода графа морских портов является отдельной крупной задачей, выходящей за рамки данного исследования.

Метод, применяемый для поиска оптимального решения, базируется на принципах эвристического программирования, основанного на генетических алгоритмах. Анализ подходящих эвристических методов выполнен в обзоре [6]. На основе известных данных о расстояниях между морскими портами и количестве контейнеров, которые необходимо перевезти, модель строит матрицу расстояний и матрицу грузооборотов контейнеров. Матрица расстояний служит основой для матрицы времен переходов судна между морскими портами. Примеры матриц приведены на рис. 2.

а)						б)							
	Порт1	Порт2	Порт3	Порт4	Порт5	Порт6		Порт1	Порт2	Порт3	Порт4	Порт5	Порт6
Порт1:	0	55	75	51	68	52	Порт1:	0,0	72,2	30,3	35,3	57,9	40,9
Порт2:	1410	0	1445	1335	1361	1397	Порт2:	72,2	0,0	47,3	46,0	14,9	38,4
Порт3:	1936	1945	0	1960	2020	1996	Порт3:	30,3	47,3	0,0	5,7	35,3	10,8
Порт4:	2819	2850	2754	0	2907	2797	Порт4:	35,3	46,0	5,7	0,0	35,5	7,7
Порт5:	4859	4935	4912	4935	0	4851	Порт5:	57,9	14,9	35,3	35,5	0,0	28,5
Порт6:	5497	5650	5519	5451	5504	0	Порт6:	40,9	38,4	10,8	7,7	28,5	0,0

Рис. 2. Примеры экранного вывода программой:

а — матрица грузооборотов контейнеров между портами (в контейнерах);

б — матрица времен переходов между портами (в часах)

В рассмотренной постановке задача сводится к задаче коммивояжера (Travelling Salesman Problem (TSP)) [7]. Данная проблема относится к классу NP-сложных задач и не может быть решена за приемлемый промежуток времени методами полного перебора значений.

Результаты (Results)

Рассматривается новый метод, в котором предлагается оптимизация маршрута контейнерной линии методами эвристического программирования на основе динамической модели сети распределения контейнерных грузов между морскими портами для доставки грузов в их хинтерленды. Функцией приспособленности может являться время или грузооборот, а также одновременное использование времени и грузооборота для проведения многокритериальной оптимизации.

Обсуждение (Discussion)

Данная задача может быть решена другими методами, в том числе методами генетических алгоритмов [8]. При этом не все методы генетических алгоритмов применимы для решения задачи коммивояжера, поскольку допускают повторный заход в уже обойденные вершины графа (пункты рейса). Для применения метода генетических алгоритмов необходимо внесение изменений в исходный алгоритм. Один из методов применительно к задаче коммивояжера был исследован авторами *метода генетических химер* [9].

В данном исследовании предлагается модификация *алгоритма генетических химер* на основе его комбинации с элементами *алгоритма упорядоченного кроссовера* (Ordered Crossover (OX)) [10]. Различия этих двух алгоритмов состоят в разном подходе к генерации недостающих генов (портов захода) при возникновении следующего поколения решений. Алгоритм генетических химер предполагает деление каждой особи надвое и случайную генерацию недостающих генов путем

подстановки случайного порта захода из неохваченного диапазона портов захода при наследовании. Алгоритм упорядоченного кроссовера предполагает скрещивание двух особей и попытку воспроизведения последовательности комбинированных генов. В тех местах, где это невозможно (один и тот же ген не должен повторяться дважды в решении), алгоритм ОХ предлагает подставить наиболее близкое решение. Однако близость решения оценивается этим алгоритмом на основе номера гена (девятый ген близок к восьмому и далек от первого или второго), в то время как в реальности близкие по номеру гены (морские порты) могут быть значительно удалены друг от друга.

Ввиду того, что алгоритм, предлагаемый в данном исследовании, базируется не на нумерации портов захода, а на времени перехода между ними или на количестве контейнеров для перевозки между ними, этот алгоритм ближе к алгоритму генетических химер. Предлагаемая модификация алгоритма приведена на рис. 3. В случае исходного алгоритма генетических химер каждая особь делилась на «голову» и «хвост» [9]. Это означает, что особь могла делиться только строго по центральным генам. В предлагаемой модификации особи также делятся пополам, однако выбирается не строго фиксированная последовательность генов (от нуля до середины — «голова», и от середины до конца — «хвост»), а любая последовательность генов, равная по размеру половине длины решения (см. рис. 3). Смещение последовательности выбранных генов от нулевого гена в сторону последнего происходит случайно.

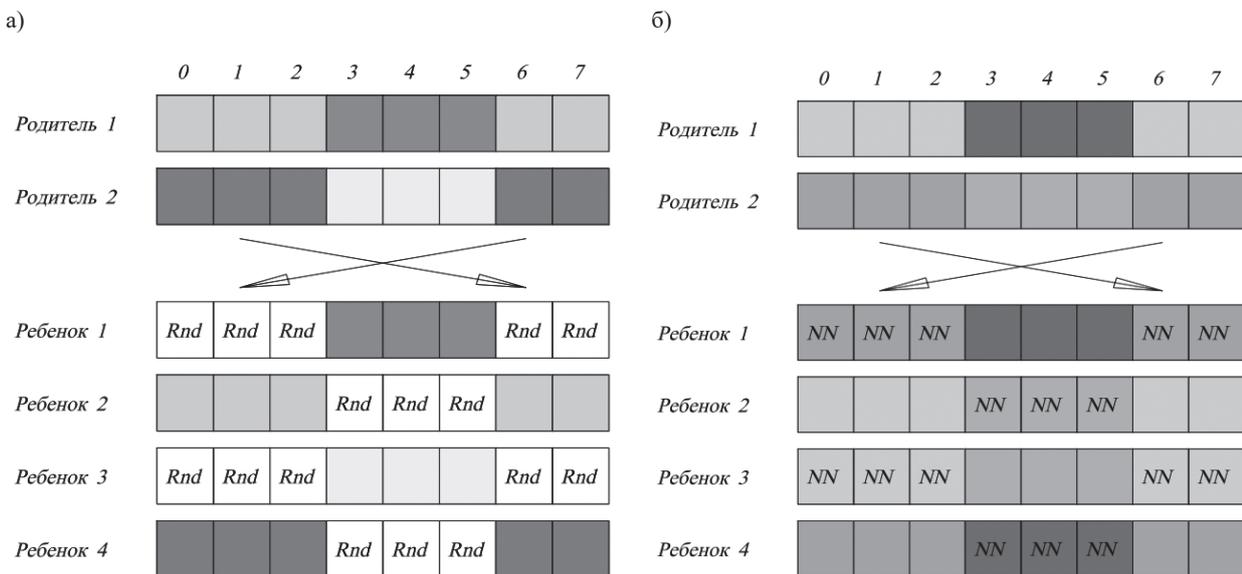


Рис. 3. Пример наследования: а — в алгоритме генетических химер;

б — в предлагаемой модификации

Условные обозначения:

Rnd — случайное воспроизведение гена;

NN (Nearest Neighbor) — подбор наиболее близкого гена

Кроме возможности случайного смещения последовательности генов вдоль длины решения, предлагается также заменить случайную генерацию недостающих генов (морских портов) на наиболее близкие (NN, Nearest Neighbor) по критерию минимального времени перехода до ближайшего порта или по критерию максимального грузооборота при разных вариантах однокритериальной оптимизации.

Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Приведен метод решения задачи оптимизации маршрута судов судоходной линии на основе динамической модели сети распределения контейнерных грузов между морскими портами и их наземными пунктами.

2. Предложена модификация алгоритма генетических химер путем комбинирования этого алгоритма с упорядоченным кроссовером.
3. Изменен принцип формирования новых недостающих генов, исходя из расстояний между портами и величиной грузопотоков.
4. В результате модификации предложен оригинальный метод мутации генов.
5. На основании предложенных изменений предполагается создание действующей модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буров В. И. Основные тенденции развития современного линейного судоходства / В. И. Буров // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. — 2015. — № 10-1. — С. 75–79.
2. Русинов И. А. Коротко о линейных конференциях / И. А. Русинов, И. А. Гаврилова, А. Г. Нелогов // Морской вестник. — 2016. — № 2 (58). — С. 113–116.
3. Кириллова Е. В. Антимонопольное освобождение в системе линейного судоходства / Е. В. Кириллова // Сборник научных трудов SWorld. — 2013. — Т. 1. — № 1. — С. 61–64.
4. Zhen L. Route and speed optimization for liner ships under emission control policies / L. Zhen, Z. Hu, R. Yan, D. Zhuge, S. Wang // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. — 2020. — Vol. 110. — Pp. 330–345. DOI: 10.1016/j.trc.2019.11.004
5. Wang H. A Three-Dimensional Dijkstra's algorithm for multi-objective ship voyage optimization / H. Wang, W. Mao, L. Eriksson // Ocean Engineering. — 2019. — Vol. 186. — Pp. 106131. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106131.
6. Галин А. В. Аналитический обзор методов маршрутизации судов в линейном контейнерном сервисе при сбое его работы / А. В. Галин, А. С. Малыхин // Транспортное дело России. — 2019. — № 2. — С. 162–164.
7. Manerba D. The traveling purchaser problem and its variants / D. Manerba, R. Mansini, J. Riera-Ledesma // European Journal of Operational Research. — 2017. — Vol. 259. — Is. 1. — Pp. 1–18.
8. Федоренко К. В. Исследование основных параметров генетического алгоритма применительно к задаче поиска оптимального маршрута / К. В. Федоренко, А. Л. Оловянников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 714–723. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-714-723.
9. Кузнецов А. Л. Метод генетических химер для решения задачи рационализации маршрутов морской транспортировки / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, Г. Б. Попов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 456–467. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-456-467.
10. Moscato P. On Genetic Crossover Operations for Relative Order Preservation: Caltech Concurrent Computation Program 158-79 / P. Moscato. — Pasadena, CA, USA: California Institute of Technology, 1989. — 10 p.

REFERENCES

1. Burov, V. I. "Osnovnye tendentsii razvitiya sovremennogo lineinogo sudokhodstva." *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk* 10-1 (2015): 75–79.
2. Rusinov, I. A., I. A. Gavrilova, and A. G. Nelogov. "Kortoko o lineinykh konferentsiyakh." *Morskoi vestnik* 2(58) (2016): 113–116.
3. Kirillova, E. V. "Antimonopol'noe osvobozhdenie v sisteme lineinogo sudokhodstva." *Sbornik nauchnykh trudov SWorld* 1.1 (2013): 61–64.
4. Zhen, Lu, Zhuang Hu, Ran Yan, Dan Zhuge, and Shuaian Wang. "Route and speed optimization for liner ships under emission control policies." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 110 (2020): 330–345. DOI: 10.1016/j.trc.2019.11.004.
5. Wang, Helong, Wengang Mao, and Leif Eriksson. "A Three-Dimensional Dijkstra's algorithm for multi-objective ship voyage optimization." *Ocean Engineering* 186 (2019): 106131. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106131.
6. Galin, A., and A. Malykhin. "Analytical review of methods of routing of vessels in the linear container service in case of failure of its work." *Transport business of Russia* 2 (2019): 162–164.

7. Manerba, Daniele, Renata Mansini, and Jorge Riera-Ledesma. “The traveling purchaser problem and its variants.” *European Journal of Operational Research* 259.1 (2017): 1–18.

8. Fedorenko, Kirill V., and Arkadii L. Olovyannikov. “Research of the main parameters of the genetic algorithm for the problem of searching the optimal route.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.4 (2017): 714–723. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-714-723.

9. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and German B. Popov. “Chimerical genetic algorithm for sea route rationalization.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.3 (2017): 456–467. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-456-467.

10. Moscato, Pablo. *On Genetic Crossover Operations for Relative Order Preservation: Caltech Cocurrent Computation Program 158-79*. Pasadena, CA, USA: California Institute of Technology, 1989.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Малыхин Александр Сергеевич — аспирант

Научный руководитель:

Галин Александр Валентинович —

доктор технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: contrship@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Malykhin, Aleksandr S. — Postgraduate

Supervisor:

Galina, 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: contrship@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 5 июня 2020 г.

Received: June 5, 2020.

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-868-876

TECHNOLOGY OF LOADING COAL INTO SPECIALIZED CONTAINERS AT THE COAL-LOADING COMPLEX

Yu. Yu. Shuvalov, E. V. Shuvalova

Rosterminalugol, JSC, Kingisepp, Russian Federation

In modern supply chains, delivery of the bulk of goods is carried out through a system of transport terminals, where there is an enlargement or splitting of cargo lots, temporary storage of goods, and transshipment of cargo units between different vehicles or different modes of transport. Some terminal facilities carry out transactions with goods that create added value. The technology of loading coal at the coal-loading complex of a mining enterprise into specialized containers of various carrying capacities, depending on the customer's requirements and consumption volumes is presented in the paper. The container transportation system makes it possible to more than halve the prime cost of cargo operations, sharply reduce the cost of packaging, increase labor productivity by 4-5 times, and provide conditions for complex mechanization and automation. The features of transportation and storage of high-quality coal and briquettes in specialized containers have been considered in many works, but the technology of loading coal into them has not been considered in detail. A method for calculating the time of loading coal into specialized containers is developed. The calculations allow you to estimate the time of loading into a specialized container, depending on the mass of the loaded coal. Transportation of coal (especially high-quality coal and briquettes) in specialized containers to various groups of consumers will contribute to keep the fuel quality, deliver it to consumers without losses and environmental pollution, and eliminate the operation of reloading from one container to another.

Keywords: coal, technological scheme of loading, containers, loading time, technology, weighing device, loading device, bunkers, limit switch, conveyor.

For citation:

Shuvalov, Yuri I., and Evgeniya V. Shuvalova. "Technology of loading coal into specialized containers at the coal-loading complex." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.5 (2020): 868–876. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-868-876.

УДК 622.333.622.721+502

ТЕХНОЛОГИЯ ПОГРУЗКИ УГЛЯ В СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ КОНТЕЙНЕРЫ НА УГЛЕПОГРУЗОЧНОМ КОМПЛЕКСЕ

Ю. Ю. Шувалов, Е. В. Шувалова

АО «Ростерминалуголь», Кингисепп, Российская Федерация

Отмечается, что в современных цепях поставок доставка основной массы грузов осуществляется через систему транспортных терминалов, где происходит укрупнение или разбиение грузовых партий, временное хранение грузов, а также перевалка грузовых единиц между различными транспортными средствами или разными видами транспорта. На некоторых терминальных объектах выполняются операции с товарами, создающие добавленную стоимость. В статье представлена технология погрузки угля на углепогрузочном комплексе горного предприятия в специализированные контейнеры разной грузоподъемности в зависимости от требований заказчика и объемов потребления. Контейнерная система перевозок позволяет более чем в 2 раза снизить себестоимость грузовых операций, резко сократить расходы на тару, в 4–5 раз повысить производительность труда, обеспечить условия для комплексной механизации и автоматизации. Подчеркивается, что особенности перевозки и хранения сортового угля и брикетов в специализированных контейнерах были рассмотрены во многих работах, но технология погрузки угля в них отражена недостаточно подробно. В настоящем исследовании разработана методика расчета времени погрузки угля в специализированные контейнеры. Выполненные расчеты позволили оценить время погрузки в специализированный контейнер в зависимости от массы загружаемого угля. Использование представленной в работе методики перевозки угля (особенно сортового и брикетов) в специализирован-

ных контейнерах различным группам потребителей поможет сохранить качество топлива, осуществить его доставку потребителям без потерь и загрязнения окружающей среды, исключить операцию перегрузки из одной тары в другую.

Ключевые слова: уголь, технологическая схема погрузки, контейнеры, время погрузки, технология, загрузочные устройства, весовое устройство, бункеры, конвейер, путевые выключатели.

Для цитирования:

Шувалов Ю. Ю. Технология погрузки угля в специализированные контейнеры на углепогрузочном комплексе / Ю. Ю. Шувалов, Е. В. Шувалова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 5. — С. 868–876. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-868-876.

Введение (Introduction)

Контейнерный портовый терминал — это масштабное предприятие морского, а также внутреннего водного транспорта, которое имеет район для осуществления погрузочно-разгрузочных работ и хранения грузов. Для осуществления операций терминалы оснащены специальной техникой и оборудованием: контейнерными перегружателями, портовыми кранами, автопогрузчиками (ричстакерами) для перемещения контейнеров и другой техникой.

Главным инфраструктурным объектом в сфере морских перевозок является морской порт, одной из функций которого как многофункционального объекта, осуществляющего в том числе интермодальные перевозки, является отправка и прием грузов как морскими судами, так и другими видами транспорта: автомобильным, железнодорожным. Портовая инфраструктура позволяет осуществлять погрузочно-разгрузочные операции, что свидетельствует о том, что к главным задачам работы морского порта также относятся логистические функции и функции таможенного терминала, так как к портам относятся таможенные органы, осуществляющие контроль объема товарооборота.

Технические предложения по сохранению количественных и качественных характеристик сортового угля и брикетов, перевозимых в специализированных контейнерах, изложены в работах ученых и исследователей в данной области: С. Б. Васильева [1] — изучение вопросов технико-экономического обоснования получения сортового угля; И. И. Демченко [2], [3] — изучение основных проблем перевозки угля навалом; Н. А. Дроздовой [4] — определение массогабаритных параметров емкостей для доставки сортового угля из забоя разреза потребителю; В. А. Ковалева [5], [6] — изучение транспортных средств для транспортировки и хранения грузов; в патентах И. И. Демченко в соавторстве [7]–[9]; А. О. Муленковой [10]–[12] — обоснование технологий и требований к оборудованию для получения сортового угля в разрезе; М. К. Пасынкова [13] — поиск путей совершенствования технологии перевозки угля; О. Ж. Рабат [14] — разработка мер совершенствования технологии перевозок и средств разгрузки угля и др.

Целью данного исследования является разработка методики расчета времени погрузки угля в специализированные контейнеры посредством решения следующих задач:

- рассмотрение технологической схемы погрузки угля;
- изучение состава загрузочных устройств;
- анализ механизма передвижения контейнеров;
- ознакомление с расчетом времени загрузки контейнера
- разработка методики расчета времени погрузки.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В процессе проведения исследования использовались следующие средства:

- рассмотрение типовой технологической схемы погрузки угля в специализированные контейнеры;
- анализ научной литературы по теме исследования;
- применение методов моделирования.

Углепогрузочный комплекс представляет сложную техническую систему, от работоспособности каждого элемента которой зависит как экологическая и промышленная безопасность, так и пропускная способность. Технология перегрузочных работ зависит от имеющегося погрузочно-оборудования [15].

Результаты (Results)

Рассмотрим технологическую схему погрузки угля на углепогрузочном комплексе в крупнотоннажные специализированные контейнеры для крупных потребителей (рис.1, *а* — начало загрузки, рис. 1, *б* — конец загрузки). Схема включает три основные группы оборудования:

- 1-я группа — загрузочные устройства;
- 2-я группа — механизмы передвижения контейнеров;
- 3-я группа — весовое устройство.

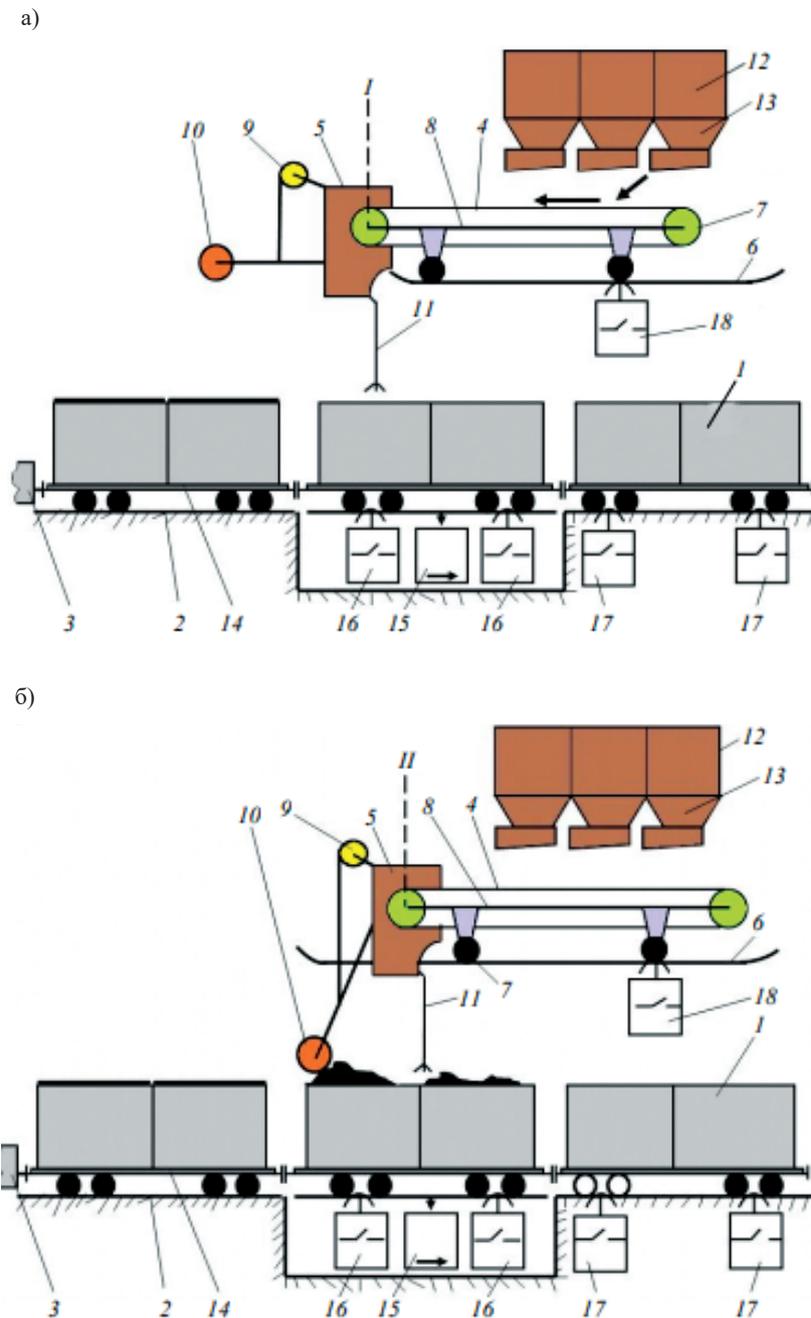


Рис. 1. Технологическая схема погрузки угля в контейнер:
а — начало загрузки; *б* — конец загрузки

Загрузочные устройства состоят из бункеров 12, качающихся питателей 13 и конвейера 4, смонтированного на тележке 8 с катками 7 для качения по полотну 6. Фиксация передвижного конвейера 4 в начале и в конце загрузки контейнера 1 производится посредством путевых выключателей 18, установленных под полотном 6 и срабатывающих при наезде реборды катка 7 тележки 8 конвейера 4. На передней части конвейера 4 установлена разгрузочная воронка 5, оборудованная подъемной лебедкой 9, предназначенной для опускания и подъема катка-уплотнителя 10, а также уровнем 11 для контроля степени заполнения контейнера 1.

Механизм передвижения контейнеров 1 включает в себя низкорамные железнодорожные платформы 14 и загрузочный путь 2. Подача порожних контейнеров 1 на загрузочный путь 2 осуществляется маневровым устройством 3. Весовое устройство состоит из весоизмерительной платформы, содержащей контейнерные весы 15 и путевые выключатели 16 и 17, с помощью которых контейнер на железнодорожной платформе фиксируется строго в зоне погрузки.

Погрузка угля в контейнеры осуществляется следующим образом. Состав порожних контейнеров 1 подается на загрузочный путь 2 в зону действия маневрового устройства 3 так, чтобы головной контейнер 1 был установлен в точке начала загрузки — на весоизмерительной платформе. Затем производится выгрузка угля из бункеров 12 в контейнер 1 с помощью качающихся питателей 13 и передвижного конвейера 4 через разгрузочную воронку 5 (см. рис. 1, а, положение I). После заполнения контейнера 1 для выравнивания верхнего слоя угля подъемной лебедкой 9 опускают каток-уплотнитель 10 (см. рис. 1, а, положение II) и закрывают крышку контейнера.

Технологическая схема погрузки угля в специализированные контейнеры для средних и мелких потребителей (рис. 2) включает три группы оборудования:

- загрузочное устройство;
- механизм передвижения контейнеров;
- весовое устройство.

Загрузочное устройство содержит те же элементы, которые используются при погрузке угля для крупных потребителей.

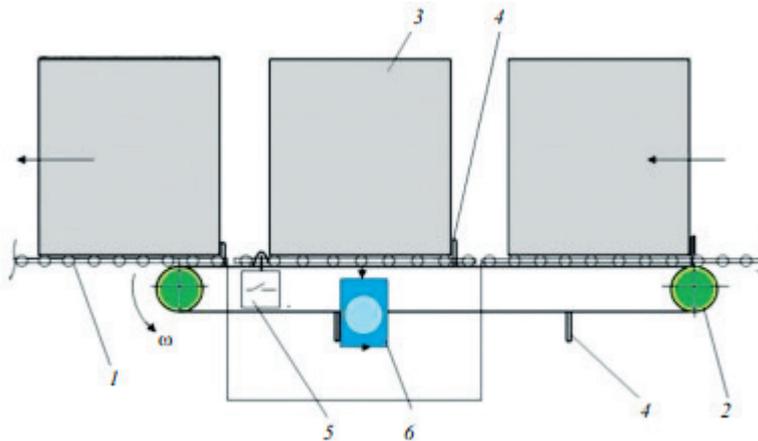


Рис. 2. Технологическая схема погрузки угля в контейнеры для средних и мелких потребителей:
 ω — угловая скорость приводной шестерни цепи

Механизм передвижения контейнеров 3 содержит рольганг 1, тяговый элемент 2, состоящий из цепи с поворотными толкателями 4 для контейнеров 3, надетой на приводную и ведомую шестерни. Весовое устройство состоит из весоизмерительной платформы, содержащей контейнерные весы 6 и путевой концевой выключатель 5, с помощью которого контейнер 3 на весоизмерительной платформе фиксируется строго в зоне погрузки. Погрузка угля в контейнеры 3 выполняется по технологии для крупных потребителей. При доставке углепродукции в контейнерах важно знать количество времени, которое будет затрачено на загрузку на углепогрузочном комплексе.

Время погрузки контейнера прямо пропорционально вмещаемой массе угля и обратно пропорционально производительности углепогрузочного устройства:

$$t_{\text{п}} = \frac{V_{\text{в}} z K_{\text{н}}}{W_{\text{выр}}} + t_{0-3}, \quad (1)$$

где $W_{\text{выр}}$ — выработка углепогрузочного устройства, т/ч;

$V_{\text{в}}$ — вмещаемый объем контейнера, м³;

z — объемный вес угля, т/м³;

$K_{\text{н}}$ — коэффициент наполнения контейнера: для мелких кусков составляет 1,0–1,1; для средних — 0,7–0,8; для крупных — 0,3–0,6;

t_{0-3} — время на закрытие и на открытие и закрытие крышки контейнера, ч.

Вмещаемый объем контейнера необходимо определить из условия изменения высоты загрузки в зависимости от времени наполнения (рис. 3):

$$H(t) = H - dH, \quad (2)$$

где H — высота загрузки контейнера;

dH — приращение высоты загрузки контейнера по времени.

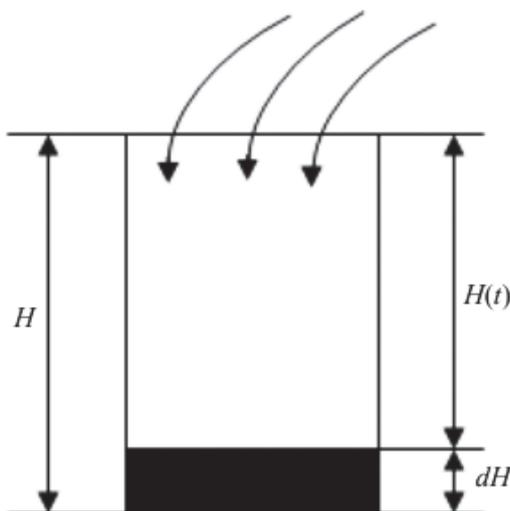


Рис. 3. Схема заполнения контейнера углем по высоте

Преобразовав выражение (2) [16], запишем

$$H(t) = H - K_{\text{н}}^{-1} g t dt,$$

где g — ускорение свободного падения.

Откуда после выполненных преобразований запишем $H(t) = H - K_{\text{н}}^{-1} g \int_0^t t \cdot dt$.

В результате получим

$$H(t) = H - (2K_{\text{н}})^{-1} g t^2, \quad (3)$$

где $t = \sqrt{2H(t)/g}$.

С учетом выражения (3) запишем

$$t = \sqrt{(2H - K_{\text{н}}^{-1} g t^2)/g}. \quad (4)$$

Преобразовав выражение (4), получим:

$$t^2 = \frac{2HK_n}{g(K_n + 1)} \quad (5)$$

Вмещаемый объем контейнера,

$$V_b = t^2 g F_k, \quad (6)$$

где F_k — площадь загрузки контейнера, м².

С учетом выражений (5) и (6) запишем

$$V_b = \frac{2HK_n F_k}{(K_n + 1)} \quad (7)$$

Тогда время загрузки контейнера, с учетом выражения (1), будет иметь вид:

$$t = \frac{2HK_n^2 F_k z}{(K_n + 1) W_{\text{выр}}} \quad (8)$$

Значения времени погрузки угля для специализированных контейнеров различных типоразмеров при $K_n = 0,75$ и производительности углепогрузочного комплекса $W_{\text{выр}} = 2000$ т/ч [14] приведены в следующей таблице:

Время погрузки угля в специализированный контейнер

Типоразмеры контейнеров	Внутренний объем, м ³	Время погрузки, с
1С	30,0	41,70
1Д	14,8	20,50
УУК-5,0	10,3	14,30
УУК-3,0	5,1	7,10
АУК-1,25	3,2	6,03
АУК-0,625	1,6	2,20

На основании табличных данных построен график зависимости времени погрузки угля от вмещаемой массы продукции (рис. 4).

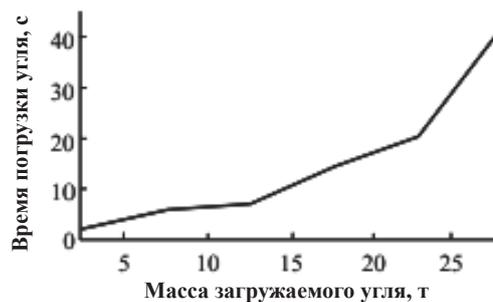


Рис. 4. Зависимость времени погрузки от массы угля, загружаемого в контейнер

Таким образом, существует определенная зависимость времени погрузки от массы угля, загружаемого в контейнер. Пропускная способность углепогрузочного комплекса зависит от ряда факторов, к которым помимо прочих факторов относятся также особенности погрузочного оборудования, технологии перегрузочных работ, тоннажности специальных контейнеров и вмещающей массы продукции.

Обсуждение (Discussion)

Отгрузка угля представляет собой сложный многофункциональный процесс, содержащий совокупности взаимосвязанных самостоятельных процессов, основными среди которых являются:

погрузка угля в вагоны, определение качества загруженного угля, предотвращение смерзаемости угля и его потерь при транспортировании [12]. Для осуществления погрузки угля используются комплексы погрузки угля (углепогрузочные комплексы). Углепогрузочный комплекс представляет собой связанное общим технологическим процессом сочетание механизмов и устройств, предназначенных для передвижения вагонов, подачи угля от мест его добычи или предварительного хранения непосредственно до погрузки в вагоны на одном железнодорожном пути (без промежуточного аккумуляирования), дозирования и взвешивания [13].

Выводы (Summary)

На основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Использование разработанных технологических схем погрузки угля в специализированные контейнеры для крупных, средних и мелких потребителей на углепогрузочном комплексе горного предприятия обеспечивает механизацию процесса погрузки.
2. Разработанная методика расчета времени погрузки и выполненные расчеты позволяют оценить время погрузки в специализированный контейнер в зависимости от объема контейнера.
3. Перевозка угля (особенно сортового и брикетов) в специализированных контейнерах различным группам потребителей позволит сохранить качество топлива, осуществить доставку потребителям без потерь и загрязнения окружающей среды, сократить время перегрузки с одного вида транспорта на другой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демченко И. И. Техничко-экономическое обоснование получения сортового угля в забое балахтинского разреза Красноярского края / И. И. Демченко, А. О. Муленкова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2019. — № 1. — С. 36–47.
2. Демченко И. И. Проблемы перевозки угля навалом и возможное решение задачи / И. И. Демченко, С. Б. Васильев // Горное оборудование и электромеханика. — 2005. — № 3. — С. 50.
3. Демченко И. И. Технология погрузки угля в специализированные контейнеры на углепогрузочном комплексе / И. И. Демченко, В. А. Ковалев, А. О. Муленкова // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2014. — № 8. — С. 9–13.
4. Муленкова А. О. Определение массогабаритных параметров емкостей для доставки сортового угля из забоя разреза потребителю / А. О. Муленкова, Н. А. Дроздова, И. И. Демченко // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2018. — № 2. — С. 76–82. DOI: 10.21440/0536-1028-2018-2-76-82.
5. Пат. 2551698 Российская Федерация, МПК В66F 1/06, В62В 1/06, В65D 90/18. Транспортное средство для транспортирования и хранения грузов / В. А. Ковалев, И. И. Демченко, А. О. Муленкова; заяв. и патентообл. Сибирский федеральный университет. — № 2014107057/11; заявл. 25.02.2014; опубл. 27.05.2015. Бюл. № 15.
6. Демченко И. И. Обоснование параметров специализированного контейнера для доставки углепродукции индивидуальным потребителям / И. И. Демченко, В. А. Ковалев, А. О. Муленкова // Транспортные системы Сибири. Развитие транспортной системы как катализатор роста экономики государства: междунар. науч.-практ. конф. — Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2016. — С. 455–463.
7. Пат. 2489337 Российская Федерация, МПК В65D 88/00. Контейнер для перевозки, хранения и выгрузки опрокидыванием сыпучих грузов / И. И. Демченко, А. В. Гилев, А. И. Косолапов, Т. А. Бровина, А. И. Демченко; заяв. и патентообл. Сибирский федеральный университет. — № 2012112575/12; заявл. 30.03.2012; опубл. 10.08.2013. Бюл. № 22. — 9 с.
8. Пат. 2271974 Российская Федерация, МПК В65D 88/54. Контейнер для перевозки, хранения и выгрузки опрокидыванием сыпучих грузов / И. И. Демченко, Ю. А. Плютов, В. А. Ковалев, С. Б. Васильев, А. А. Тарских, А. И. Демченко, О. М. Мурашева (заяв. и патентообл.). — № 2004125311/12; заявл. 18.08.2004; опубл. 20.03.2006. Бюл. № 8. — 8 с.
9. Пат. 2178379 Российская Федерация, МПК В65D 88/54, В65D 88/00. Контейнер для сыпучих грузов / И. И. Демченко, В. Д. Буткин, С. В. Ивкин, С. Б. Васильев, А. И. Демченко; заяв. и патентообл. ОАО «Институт КАТЭКНИИУголь». — № 2000115074/13; заявл. 09.06.2000; опубл. 09.06.2000, Бюл. № 2. — 8 с.

10. Демченко И. И. О возможности размещения перерабатывающего оборудования в забое разреза для получения сортового угля / И. И. Демченко, А. О. Муленкова // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2017. — № 8. — С. 26–32. DOI: 10.21440/0536-1028-2017-8-26-32.

11. Пат. 2537875 Российская Федерация, МПК В65D 88/54. Контейнер для сыпучих грузов / В. А. Ковалев, И. И. Демченко, А. О. Муленкова. заяв. и патентообл. Сибирский федеральный университет. — № 2013133479/12; заявл. 18.07.2013; опубл. 10.01.2015, Бюл. № 1.

12. Муленкова А. О. Обоснование технологии и требования к оборудованию для получения сортового угля в разрезе: дис. ... канд. техн. наук / А. О. Муленкова. — Красноярск, 2019. — 170 с.

13. Пасынков М. К. Совершенствование технологии перевозки угля на примере Балахтинского района Красноярского края: бакалаврская работа. — Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2018. — 82 с.

14. Рабат О. Ж. Совершенствование технологии перевозок и средств разгрузки угля / О. Ж. Рабат, С. В. Ли, Д. А. Агабекова, А. Н. Салманова // Повышение качества образования, современные инновации в науке и производстве: сб. тр. междунар. науч.-практ. конф. — Филиал Кузбасского гос. техн. ун-та имени Т. Ф. Горбачева в г. Прокопьевске, 2019. — С. 439–445.

15. Чебан А. Ю. Технология разработки угольного месторождения с применением выемочно-погрузочного комплекса / А. Ю. Чебан // Маркшейдерский вестник. — 2019. — № 4 (131). — С. 55–59.

16. Чебан А. Ю. Способ добычных работ для малых угольных разрезов с применением усовершенствованного карьерного комбайна / А. Ю. Чебан // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2019. — № 2. — С. 36–42. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-36-42.

REFERENCES

1. Demtchenko, I. I., and A. O. Mulenkova. “Feasibility study for in-pit high-grade coal production at Balakhtinsky coal mine, Krasnoyarsk region.” *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)* 1 (2019): 36–47.

2. Demchenko, I. I., and S. B. Vasil’ev. “Problemy perevozki uglya navalom i vozmozhnoe reshenie zadachi” *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika* 3 (2005): 50.

3. Demchenko, I. I., V. A. Kovalev, and A. O. Mulenkova. “Technology of loading coal in specialized containers on a coal-loading complex.” *News of the Higher Institutions. Mining Journal* 8 (2014): 9–13.

4. Mulenkova, A. O., I. I. Demchenko, and N. A. Drozdova. “Determination of weight and size parameters of containers for high-quality coal delivery from the face of an open pit to the consumer.” *News of the Higher Institutions. Mining Journal* 2 (2018): 76–82. DOI: 10.21440/0536-1028-2018-2-76-82.

5. Kovalev, V. A., I. I. Demchenko, and A. O. Mulenkova. RU 2 551 698 C1, IPC 66 F 1/06, B 62B 1/06, B 65D 90/18. Transportnoe sredstvo dlya transportirovaniya i khraneniya грузов. Russian Federation, assignee. Publ. 27 May 2015.

6. Demchenko, I. I., V. A. Kovalev, and A. O. Mulenkova. “Obosnovanie parametrov spetsializirovannogo konteynera dlya dostavki ugleproduktsii individual’nym potrebitelyam.” *Transportnye sistemy Sibiri. Razvitie transportnoi sistemy kak katalizator rosta ekonomiki gosudarstva. Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya*. Krasnoyarsk: Sibirskii federal’nyi universitet, 2016. 455–463.

7. Demchenko, I. I., A. V. Gilev, A. I. Kosolapov, T. A. Brovina, and A. I. Demchenko. RU 2 489 337 C1, IPC B 65D 88/00. Konteyner dlya perevozki, khraneniya i vygruzki oprokidyvaniem sypuchikh грузов. Russian Federation, assignee. Publ. 10 Aug. 2013.

8. Demchenko, I. I., Yu. A. Plyutov, V. A. Kovalev, S. B. Vasil’ev, A. A. Tarskikh, A. I. Demchenko, and O. M. Murasheva. RU 2 271 974 C1, IPC B 65D 88/54. Konteyner dlya perevozki, khraneniya i vygruzki oprokidyvaniem sypuchikh грузов. Russian Federation, assignee. Publ. 20 Mar. 2006.

9. Demchenko, I. I., V. D. Butkin, S. V. Ivkin, S. B. Vasil’ev, and A. I. Demchenko. RU 2 178 379 C1, IPC B 65D 88/54, B 65D 88/00. Konteyner dlya sypuchikh грузов. Russian Federation, assignee. Publ. 9 Jun. 2000.

10. Demchenko, I. I., and A. O. Mulenkova. “Concerning the possibility of placing the processing equipment in the face of an open pit to obtain sized coal.” *News of the Higher Institutions. Mining Journal* 8 (2017): 26–32. DOI: 10.21440/0536-1028-2017-8-26-32.

11. Kovalev, V. A., I. I. Demchenko, and A. O. Mulenkova. RU 2 537 875 C1, IPC B 65D 88/54. Konteyner dlya sypuchikh грузов. Russian Federation, assignee. Publ. 10 Jan. 2015.

12. Mulenkova, A. O. Obosnovanie tekhnologii i trebovaniya k oborudovaniyu dlya polucheniya sortovogo uglya v razreze. PhD diss. Krasnoyarsk, 2019.
13. Pasyнков, М. К. Sovershenstvovanie tekhnologii perevozki uglya na primere Balakhtinskogo raiona Krasnoyarskogo kraya. Bachelor Thesis. Krasnoyarsk: Sibirskii Federal'nyi Universitet, 2018.
14. Rabat, O. Zh., S. V. Li, D. A. Agabekova, and A. N. Salmanova. "Sovershenstvovanie tekhnologii perevozok i sredstv razgruzki uglya." *Povyshenie kachestva obrazovaniya, sovremennye innovatsii v nauke i proizvodstve. Sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Filial Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni T. F. Gorbacheva v g. Prokop'evske, 2019. 439–445.
15. Cheban, A. Yu. "Technology of development of coal deposit with the use of extremely-loading complex." *Mine Surveying Bulletin* 4(131) (2019): 55–59.
16. Cheban, A.Yu. "Method of exercise work for small coal cuts with the application of an advanced mine operating combine." *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)* 2 (2019): 36–42.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шувалов Юрий Юрьевич —
бригадир смены производственного комплекса
АО «Ростерминалуголь»
188480, Российская Федерация, Кингисепп,
ул. Химиков, 5В
e-mail: shuvalov.iury@yandex.ru

Шувалова Евгения Викторовна —
оператор центрального пульта управления
АО «Ростерминалуголь»
188480, Российская Федерация, Кингисепп,
ул. Химиков, 5В
e-mail: evshuvalovajob@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shuvalov, Yuri I. —
Shift foreman of factory complex
Rosterminalugol, JSC
5V Khimikov Str., Kingisepp, 188480,
Russian Federation
e-mail: shuvalov.iury@yandex.ru

Shuvalova, Evgeniya V. —
Operator of central control panel
Rosterminalugol, JSC
5V Khimikov Str., Kingisepp, 188480,
Russian Federation
e-mail: evshuvalovajob@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 30 августа 2020 г.
Received: August 30, 2020.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-877-883

METHOD OF COMPARATIVE IDENTIFICATION OF MARINE OBJECTS TAXONOMY

A. S. Sobolev, V. A. Dorovskoy, N. P. Smetyh

Kerch State Maritime University, Kerch, Russian Federation

Information organizational systems that have been successfully used in the various areas of economy for more than twenty years are now divided into two main groups: integrated and highly specialized systems. The class of highly specialized systems includes information systems for banking automation, statistics, financial and accounting (for example, IC, FinExpert, SoNet), marketing, and investment management (for example, Project Expert). Integrated organizational systems include corporate information systems, which today successfully displace traditional automated enterprise management systems in the field of production. The purpose of the research is to improve the efficiency and quality of intellectual processing of poorly formalized information in the organizational information systems based on the implementation of information and logical models and methods of marine objects; the object of research is information processing processes in the organizational information systems. The subject of the research is information technologies for intellectual processing of poorly formalized information used in the organizational systems based on the algebraic-logical models. Research methods are based on the complex use of the theory of intelligence, category theory, algebra of finite predicates and the method of comparative identification for the development of information and logical models and methods of knowledge identification. Predicate algebra and category theory are used to formalize knowledge, describe natural language relations, and model the Manager's intellectual activity in documents processing tasks. The comparator identification method is used to describe the intellectual functions of a corporate information system user. Thus, the method of comparative identification allows you to automatically divide the texts of documents in full-text databases into identical ones (in relation to the areas of knowledge of the Manager of a marine object), and divide information semantic units expressed by CS, rubrics, and UDC classes into equivalence classes that define top-rank taxa, allowing you to automate the process of developing a corporate taxonomy.

Keywords: comparative identification, taxonomy, marine objects, intelligent functions, corporate information system, marine object, marine manager.

For citation:

Sobolev, Alexandr S., Vladimir A. Dorovskoy, and Nadezhda P. Smetyh. "Method of comparative identification of marine objects taxonomy." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.5 (2020):877–883. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-877-883.

УДК 681.5:004

МЕТОД КОМПАРАТОРНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТАКСОНОМИИ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ

А. С. Соболев, В. А. Доровской, Н. П. Сметюх

ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет»,
Керчь, Российская Федерация

Отмечается, что информационные организационные системы, успешно используемые в различных областях больше двадцати лет, делятся на две основные группы: интегрированные и узкоспециализированные системы. К классу узкоспециализированных систем можно отнести информационные системы для автоматизации банковской деятельности, в статистике, для финансового и бухгалтерского учета (например, IC, FinExpert, SoNet), в маркетинге, в инвестиционном менеджменте (например, Project Expert). К интегрированным организационным системам относятся корпоративные информационные системы, которые сегодня успешно вытесняют в сфере производства традиционные автоматизированные системы управления предприятием. Целью исследований является повышение эффективности и качества интеллектуальной обработки слабо формализованной информации в организационных информационных системах на основе реализации информационно-логических моделей и методов морских

объектов. Объектом исследования являются процессы обработки информации в организационных информационно-технологических системах. Предметом исследования являются информационные технологии интеллектуальной обработки слабо формализованной информации, применяемые в организационных системах, основанные на алгебро-логических моделях. Рассматриваемые в работе методы исследования базируются на комплексном использовании теории интеллекта, теории категорий, алгебры конечных предикатов и метода компараторной идентификации для разработки информационно-логических моделей и методов идентификации знаний. Алгебра предикатов и теория категорий используется для формализации знаний, описания естественно-языковых отношений и моделирования интеллектуальной деятельности менеджера применительно к задачам обработки документов. Рассмотрен метод компараторной идентификации, используемый для описания интеллектуальных функций пользователя корпоративной информационной системы. Таким образом, метод компараторной идентификации позволяет автоматически разделять тексты документов полнотекстовых баз данных на тождественные (по отношению к областям знаний менеджера морского объекта) и разбивать информационные смысловые единицы, выражаемые компараторной сетью, рубриками и классами УДК, на классы эквивалентностей, определяющие таксоны верхнего ранга, позволяющие автоматизировать процесс разработки корпоративной таксономии.

Ключевые слова: компараторная идентификация, таксономия, морские объекты, интеллектуальные функции, корпоративная информационная система, менеджер морского объекта.

Для цитирования:

Соболев А. С. Метод компараторной идентификации таксономии морских объектов / А. С. Соболев, В. А. Доровской, Н. П. Сметюх // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 5. — С. 877–883. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-877-883.

Введение (Introduction)

Актуальность исследований основана на применении полученных методов разработки систем общения с ЭВМ на языке, понятном компьютеру и менеджеру морского объекта. Повышение эффективности вывода в автоматизированных информационных морских системах морской информации обусловлено непрерывно увеличивающимся объемом различных данных во всех отраслях человеческой деятельности и соответствующими потребностями менеджеров оперативно, полно и качественно получать документные и электронные первоисточники. С возрастанием объемов накопленной информации возникает задача представления знаний и интеллектуального анализа данных с целью предоставления пользователю возможности правильно ориентироваться в среде электронных ресурсов большого объема, а морскому эксперту (сотруднику организации) — возможности автоматизировать некоторые участки своей работы.

Современная морская организационная система — это рациональное объединение менеджеров морских объектов и привлечение ресурсов в обособленном целенаправленном коллективе, обеспечивающем распределение обязанностей, координацию действий морских менеджеров для достижения поставленной цели и их ориентацию на конечный результат.

В рамках данного исследования под *морской системой* понимается такая организационная форма деятельности, при которой ее структура предполагает наличие множества территориально распределенных объектов, взаимодействующих между собой в процессе деятельности и обменивающихся большими объемами информации.

Методы и материалы (Methods and Materials)

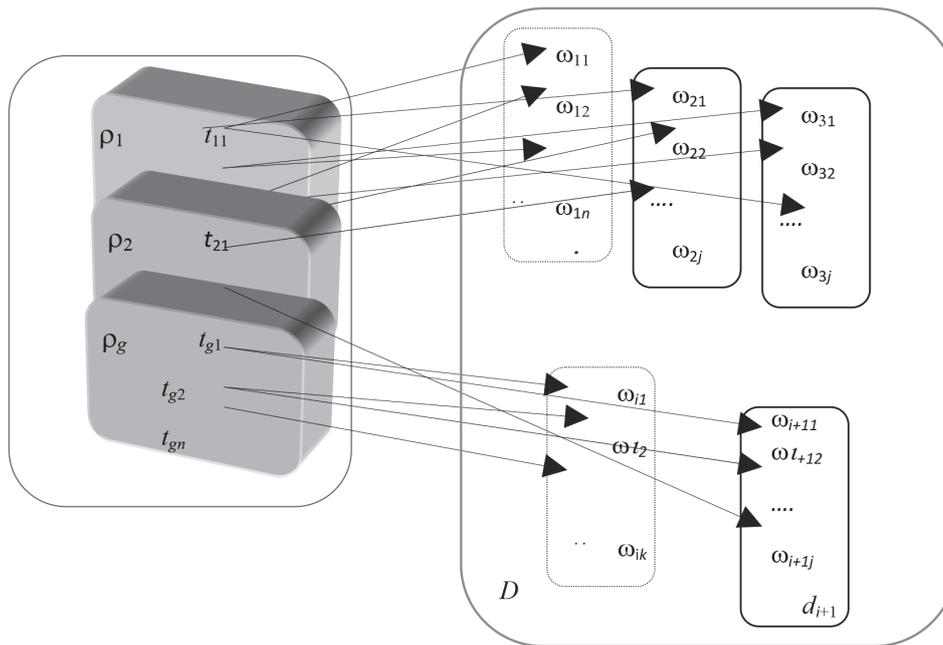
Методы исследования базируются на комплексном использовании теории интеллекта, теории категорий, алгебры конечных предикатов и метода компараторной идентификации для разработки информационно-логических моделей и методов идентификации знаний. Алгебра предикатов и теория категорий используются для формализации знаний в задачах обработки документов. Метод компараторной идентификации используется для описания интеллектуальных функций пользователя корпоративной информационной системы.

Результаты (Results)

В процессе интеллектуальной обработки документов и смысловых единиц компаратор реализует бинарный предикат персонификации интеллектуального ресурса морской компании $P(t, r)$ (). Полагаем, что выбор значения предиката $\varepsilon = P(t, r)$, $\varepsilon = \{0, 1\}$ полностью определяется смыслом, раскрываемым в документе: $\omega = g(d)$, и концептом $\rho = f(t)$, соответствующим КС (компараторной сети), рубрике или классу УДК — t . В результате понимания смысла документа и значения понятия определяется соответствие ($\varepsilon = 1$) или несоответствие ($\varepsilon = 0$) смысла, раскрываемого в морском документе ω , понятию ρ . Применяем предикат аналитико-синтетической обработки документа [1]–[4] $\varepsilon = Z(\tau, \rho)$, реализующий функцию понимания менеджером морского объекта смысла текста и значения смысловых единиц. Предикаты P и Z , функции f и g , переменные d, t, ω, ρ связаны зависимостью

$$P(d, t) = Z(g(d), f(t)) = Z(\omega, \rho). \quad (1)$$

Установление конкретного вида предиката $Z(\omega, \rho)$ позволяет группировать смысловые единицы по классам *условной* и *безусловной эквивалентности*. Под классификацией смысловых единиц в данном случае понимаем процесс распределения концептов, определяемых данными единицами, на взаимно исключающие таксоны¹, представляющие множество объектов, имеющих общие содержательные признаки. Корпоративная таксономия, приведенная на логической схеме, строится таким образом, чтобы в получившейся иерархической системе каждый таксон занимал определенное относительно других классов точно фиксированное место.



Логическая схема формирования корпоративной таксономии

Основной принцип деления смысловых единиц основан на лексической синонимии (безусловной эквивалентности) и семантической родственности слов. Использование равенства (1) позволяет перейти от субъективного восприятия смыслов к объективному отношению между документами и смысловыми единицами (представленными ключевыми словами и словосочетаниями, классами УДК и рубриками), соответствующими $P(d, t) = 1$ или $P(d, t) = 0$, несоответствующей тексту документа. Доказано, что введенные на множествах $D * D$ и $T^k * T^k$ предикаты документов и смысловых единиц соответствуют персонифицированному интеллектуальному ресурсу k -го менеджера морского объекта:

¹ Таксон — группа объектов, связанных степенью общности свойств и признаков.

$$G_1(d_1, d_2) = \forall t^k \in T^k (P(d_1, t^k) \sim P(d_2, t^k)); \quad (2)$$

$$G_2(t_1^k, t_2^k) = \forall d \in D (P(d, t_1^k) \sim P(d, t_2^k)). \quad (3)$$

Эти группы объектов являются предикатами эквивалентности, так как удовлетворяют условиям рефлексивности, транзитивности и симметричности и однозначно определяются предикатом персонифицированного интеллектуального ресурса морской компании $P(d, t^k)$. Предикат, устанавливающий разбиение ψ_1 , — G_1 , выполняет также разбиение множества D на слои текстов документов. Все документы, принадлежащие одному слою разбиения, относятся к одной области знаний менеджера морского объекта. Любые документы, взятые из разных слоев разбиения ψ_1 , содержат информацию, относящуюся к различным областям знаний менеджеров морского объекта. Разбиение ψ_2 множества T на слои смысловых единиц осуществляет предикат G_2 который определяет при разбиении КС классы классификаторов, характеризуемые определенной степенью общности. Все смысловые единицы, принадлежащие одному слою разбиения, относятся к одному таксону. Вместе с тем любые две смысловые единицы, взятые из разных слоев разбиения ψ_2 , относятся к различным таксонам.

Функция $f(t)$ связывает КС, классы-классификаторы или рубрику t , отображаемые лексическими единицами естественного языка, с тем понятием ρ , которое они выражают. Т. е. понимая смысловую единицу, менеджер компании осознает обозначаемое ею и объем [3]–[6]. Тогда предикат эквивалентности G_1 на декартовом произведении $D^* D$ можно представить в виде

$$G_1(d_1, d_2) = T_1(g(d_1), g(d_2)), \quad (4)$$

где g — сюръективная функция, представляющая каноническое отображение множества D на разбиение ψ_1 ; T_1 — предикат равенства на ψ_1 .

Документы d_1 и d_2 будут тождественны, если им соответствует один и тот же образ: $g(d_1) = g(d_2)$. Таким образом, осуществляется моделирование процесса понимания смысла текстов документов, тождественных относительно одной области знаний менеджера, с помощью компараторной идентификации предиката G_1 путем сравнения значений функции понимания текстов документов g . В данной модели компаратор в текущий момент времени анализирует (сравнивает) ощущения в понимании смысла двух текстов документов, принимая на этой основе решение об их эквивалентности или неэквивалентности. Реакция компаратора может принимать только два булевых значения: $\{0, 1\}$.

Предикат эквивалентности G_2 на декартовом произведении $T^k * T^k$ можно представить в виде

$$G_2(t_1^k, t_2^k) = D_1(f(t_1), f(t_2)), \quad (5)$$

где f — сюръективная функция, представляющая каноническое отображение множества T на разбиение ψ_2 ; D_1 — предикат равенства на декартовом произведении $\psi_2 * \psi_2$.

Терминологические понятия t_1^k и t_2^k называются *тождественными*, если $f(t_1) = f(t_2)$. Формула (4) моделирует процесс распознавания КС, рубрик и классов УДК, тождественных относительно одной области знаний менеджера. Осуществляя компарацию предиката G_2 путем сравнения значений функции понимания терминологического понятия f , компаратор анализирует (сравнивает) понимание смысла двух смысловых единиц, принимая решение об их эквивалентности или неэквивалентности [7]–[9]. Если два терминологических понятия эквивалентны относительно одной области знаний менеджера, то реакция компаратора соответствует значению 1 предиката G_2 , и значению 0 — в противоположном случае.

Можно выразить предикат аналитико-синтетической обработки документов, поступающих на вход КИС Z (1) через предикат персонификации интеллектуального ресурса компании и функции понимания документа и терминологического понятия:

$$Z(\omega, \rho) = \exists d \in D \exists t \in T (P(d, t) g(d, \omega) f(t, \rho) = P(g^{-1}(\omega), f^{-1}(\rho))), \quad (6)$$

где $g^{-1}(\omega)$ — один из элементов $d \in D$, удовлетворяющих условию $\omega = g(d)$, а $f^{-1}(\rho)$ обозначает один из элементов $t \in T$, удовлетворяющих условию $\rho = f(t)$.

Из равенства (1) можно определить

$$P(d, t) = \exists \omega \in D' \exists \rho \in T' (Z(\omega, \rho) g(d, \omega) f(t, \rho)). \quad (7)$$

Будем считать смысловые единицы t_1 и t_2 условно эквивалентными, если они соответствуют концептам $\rho_1 = f(t_1)$ и $\rho_2 = f(t_2)$, относящимся к одному дескриптору, раскрывающему смысл текста одного документа: $\omega_1 \in d$ и $\omega_2 \in d$.

Значениями переменных ω и ρ служат не сами слои разбиения ψ_1 и ψ_2 , а их имена D' и T' . Следует отличать множества слоев разбиения ψ_1 и ψ_2 от множеств имен этих слоев D' и T' , подтемы, отражаемые документами, смысл, понимание которого соответствует области знаний менеджера морского объекта, а также подрубрики и классы, объединяющие смысловые единицы и таксоны, так называемые *данные объединения*.

Имена слоев разбиения можно выбрать произвольным образом, но при этом каждому классу разбиения должно соответствовать в точности одно имя. Каждая область знаний менеджера морского объекта из множества D' характеризуется как слой разбиений ψ_1 и ψ_2 множества D , состоящего из всевозможных текстов документов $d' \in D$, тождественных по смыслу или по осмыслению ситуации тексту документа d . О тексте документа d известно, что он освещает смысл ω , $\omega = g(d)$. Множество D' всех областей знаний, рассматриваемых с помощью данной корпоративной информации, характеризует разбиение ψ_1 [9]–[13]. В свою очередь, понятие $\rho = f(t)$ из множества T' характеризуется как слой ψ_2 разбиения ψ_2 , состоящий из ключевых слов, классов УДК и рубрик $t' \in T$, тождественных смысловой единице t .

Предикат g связывает предметную переменную ω , служащую именами слоев разбиения ψ_1 , и переменную d , обозначающую текст документа из множества D . Разбиение ψ_1 выступает в роли множества D' всех областей знаний менеджера, определенных осмыслением текстов документов, взятых из множества D .

Предикат $f(t, \rho)$ отображает связь между слоями разбиения смысловых единиц ψ_2 . В роли множества T' выступает совокупность имен всех слоев разбиения ψ_2 , представляющих собой множество таксонов. Имена таксонов следующего уровня таксономии могут выбираться менеджером вручную, если разбиение на области знаний осуществляется в диалоговом режиме, либо в автоматическом режиме. Имя слоя разбиения (имя таксона), который объединяет смысловые единицы, представляющие таксоны нижнего ранга, может определяться по наиболее общему понятию, входящему в данный слой разбиения.

Критерием выбора имени таксона высшего ранга из класса эквивалентных смысловых единиц может считаться полнота выражения смыслового значения данного класса, формально выраженная его весовой нагруженностью и информационной значимостью.

Выводы (Summary)

На основании проведенных исследований сделан вывод о том, что метод компараторной идентификации может разделять тексты документов полнотекстовых баз данных на тождественные. Кроме того, использование данного метода позволяет разбивать информационные смысловые единицы, выражаемые компьютерными системами, рубриками и классами в виде универсального десятичного кода, на классы эквивалентностей. Это разбиение определяет таксоны верхнего ранга, позволяя автоматизировать процесс разработки корпоративной таксономии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко М. Ф. Модели языка / М. Ф. Бондаренко, В. А. Чикина, Ю. П. Шабанов-Кушнаренко // Бионика интеллекта. — 2004. — № 61. — С. 27–37.
2. Бондаренко М. Ф. Об общей теории компараторной идентификации / М. Ф. Бондаренко, С. Ю. Шабанов-Кушнаренко, Ю. П. Шабанов-Кушнаренко // Бионика интеллекта. — 2008. — № 2(69). — С. 13–22.
3. Петров Э. Г. Компараторная структурно-параметрическая идентификация моделей скалярного многофакторного оценивания: моногр. / Э. Г. Петров, В. В. Крючковский. — Херсон: Олди-плюс, 2009. — 294 с.

4. Хайрова Н. Ф. Использование элементов метаданных OPENDOCUMENT FORMAT для решения задачи структурирования и извлечения информации / Н. Ф. Хайрова // Вестник Херсонского государственного технического университета. — 2009. — № 6(29). — С. 42–45.

5. Шабанов-Кушнарченко Ю. П. Теория интеллекта: математические средства / Ю. П. Шабанов-Кушнарченко. — Х.: Вища шк., 1984. — 143 с.

6. Шабанов-Кушнарченко Ю. П. Компараторная идентификация лингвистических объектов: монография / Ю. П. Шабанов-Кушнарченко, Н. В. Шаронова. — К.: ИСДО, 1993. — 116 с.

7. Шаронова Н. В. Модель извлечения глубинных знаний для систем организационного управления / Н. В. Шаронова, В. А. Тарловский, Н. Ф. Хайрова // Вестник Херсонского национального технического университета. — 2010. — № 2 (38). — С. 97–102.

8. Von Bertalanffy L. An Outline of General System Theory / L. Von Bertalanffy // British Journal for the Philosophy of Science. — 1950. — Vol. 1. — P. 134–165. DOI: 10.1093/bjps/I.2.134.

9. Bar-Yossef Z. Efficient search engine measurements / Z. Bar-Yossef, M. Gurevich // Proceedings of the 16th international conference on World Wide Web. — 2007. — С. 401–410. DOI: 10.1145/1242572.1242627.

10. Hammer M. Reengineering the Corporation. A Manifesto for Business Revolutions / M. Hammer, J. Champy. — 1st Edition. — New York: HarperBusiness, 1993. — 240 p.

11. Черный С. Г. Увеличение степени отказоустойчивости в программно-аппаратных системах сетевого управления на примере мягкого облачного хранилища / С. Г. Черный, А. А. Жиленков // Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. — 2020. — № 1. — С. 28–35. DOI: 10.36535/0548-0027-2020-01-4.

12. Биденко С. И. Информационная технология компенсаторной идентификации пространственных данных от оптических систем наблюдения беспилотных аппаратов / С. И. Биденко, Д. А. Елизаров, С. Г. Черный, В. М. Шестаков // Информация и космос. — 2020. — № 1. — С. 120–126.

13. Жиленков А. А. Повышение степени отказоустойчивости в сложных программно-аппаратных системах сетевого управления / А. А. Жиленков, С. Г. Черный // Датчики и системы. — 2019. — № 12 (242). — С. 11–17. DOI: 10.25728/datsys.2019.12.2.

REFERENCES

1. Bondarenko, M. F., V. A. Chikina, and Ju. P. Shabanov-Kushnarenko. “Modeli jazyka.” *Bionika intellekta* 61 (2004): 27–37.

2. Bondarenko, M. F., S. Ju. Shabanov-Kushnarenko, and Ju.P. Shabanov-Kushnarenko. “Ob obshhej teorii komparatornoj identifikacii.” *Bionika intellekta* 2(69) (2008): 13–22.

3. Petrov, Je. G., and V. V. Krjuchkovskij. *Komparatornaja strukturno-parametricheskaja identifikacija modelej skaljarnogo mnogofaktornogo ocenivaniya: Monografija*. Herson: Oldi-pljus, 2009.

4. Hajrova, N. F. “Ispol’zovanie jelementov metadannyh OPENDOCUMENT FORMAT dlja reshenija zadachi strukturirovaniya i izvlechenija informacii.” *Vestn. Herson. gos. tehn. un-ta* 6(29) (2009): 42–45.

5. Shabanov-Kushnarenko, Ju. P. *Teorija intellekta: matematicheskie sredstva*. H.: Vishha shk., 1984.

6. Shabanov-Kushnarenko, Ju. P., and N. V. Sharonova. *Komparatornaja identifikacija lingvisticheskikh ob#ektov: monografija*. K.: ISDO, 1993.

7. Sharonova, N. V., V. A. Tarlovskij, and N. F. Hajrova. “Model’ izvlechenija glubinyh znaniy dlja sistem organizacionnogo upravlenija.” *Vestnik Hersonskogo nacional’nogo tehničeskogo universiteta* 2(38) (2010): 97–102.

8. Von Bertalanffy, Ludwig. “An Outline of General System Theory.” *British Journal for the Philosophy of Science* 1 (1950): 134–165. DOI: 10.1093/bjps/I.2.134.

9. Bar-Yossef, Ziv, and Maxim Gurevich. “Efficient search engine measurements.” *Proceedings of the 16th international conference on World Wide Web*. 2007. 401–410. DOI: 10.1145/1242572.1242627.

10. Hammer, Michael, and James Champy. *Reengineering the Corporation. A Manifesto for Business Revolutions*. 1st edition. New York: HarperBusiness, 1993.

11. Chernyi, S. G., and A. A. Zhilenkov. “Enhanced fault tolerance in software and hardware network control systems as the case of soft cloud storage.” *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics* 1 (2020): 28–35.

12. Bidenko, Sergey Ivanovich, Dmitry Aleksandrovich Elizarov, Sergey Grigoryevich Cherny, and Vasily Mikhaylovich Shestakov. “Information technology for compensatory identification of spatial data from optical surveillance systems of unmanned vehicles.” *Information and Space* 1 (2020): 120–126.

13. Zhilenkov, Anton A., and Sergei G. Chernyi. “Increasing fault tolerance in complex hardware-software network control systems.” *Sensors & Systems* 12(242) (2019): 11–17. DOI: 10.25728/datsys.2019.12.2.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Соболев Александр Сергеевич —
инженер
ФГБОУ ВО «КГМТУ»
298309, Российская Федерация, Керчь,
ул. Орджоникидзе, 82
e-mail: sobolev.alexandr1496@gmail.com
Доровской Владимир Алексеевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «КГМТУ»
298309, Российская Федерация, Керчь,
ул. Орджоникидзе, 82
e-mail: dora1943@mail.ru
Сметюх Надежда Павловна —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «КГМТУ»
298309, Российская Федерация, Керчь,
ул. Орджоникидзе, 82
e-mail: nadya.s.2011@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sobolev, Alexandr S. —
Engineer
Kerch State Maritime University
82 Ordzhonikidze Str., Kerch, 298309,
Russian Federation
e-mail: sobolev.alexandr1496@gmail.com
Dorovskoy, Vladimir A. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Kerch State Maritime University
82 Ordzhonikidze Str., Kerch, 298309,
Russian Federation
e-mail: dora1943@mail.ru
Smetyh, Nadezhda P. —
PhD
Kerch State Maritime University
82 Ordzhonikidze Str., Kerch, 298309,
Russian Federation
e-mail: nadya.s.2011@yandex.ru

*Статья поступила в редакцию 6 октября 2020 г.
Received: October 6, 2020.*

EVALUATION OF POST-VOYAGE OPERATIONS DURATION BY THE SHIPOWNER'S EMPLOYEES USING SIMULATION MODELLING METHODS

M. D. Diakonova, A. D. Semenov

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

The procedures performed in the shipping company after the completion of the voyage are discussed in the paper. In order to structure and formalize the process, the logic of this operation, network model of its implementation and some temporal characteristics of the operations are considered. The main feature of the process is the high level of uncertainty and variation in the operations duration. This is concerned with necessity to resolve the conflict among transportation process participants in the case of payment issues. In order to evaluate the probability distribution of the process duration, the Monte-Carlo method is applied. The chosen probability distributions of operations duration are defined. The simulation results have shown that most of the time the process can be completed in a short time. At the same time, a large variation in the implementation time of individual works leads to significant delays in the implementation of the investigated operations. An approach to the evaluation of operations time distribution is also considered. The approach suggests that the operation is considered as the number of small actions which are implemented by the process participants. It is proved that in this case the laboriousness of data collection and evaluation of probability distribution is much lower.

Keywords: network planning, simulation modelling, Monte-Carlo method, shipping company, tanker, demurrage, freight, digitalization, commercial activity, operational research.

For citation:

Diakonova, Mariia D., and Anton D. Semenov. "Evaluation of post-voyage operations duration by the shipowner's employees using simulation modelling methods." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 12.5 (2020): 884–893. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-884-893.

УДК 656.09

ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ВЫПОЛНЕНИЯ ПОСЛЕРЕЙСОВЫХ ОПЕРАЦИЙ СОТРУДНИКАМИ СУДОВЛАДЕЛЬЦА МЕТОДАМИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

М. Д. Дьяконова, А. Д. Семенов

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

В данной работе рассмотрены процедуры, выполняемые в судоходной компании после завершения рейса. Для структуризации и формализации изучаемого процесса показан алгоритм его осуществления, построена сетевая модель выполнения операций, а также приводятся временные характеристики отдельных работ. Особенностью проанализированных операций является высокая неопределенность продолжительности работ, что связано с необходимостью разрешения конфликтов по взаиморасчетам между участниками перевозки. Для оценки распределения времени выполнения всего процесса используется моделирование операций компании методом Монте-Карло. В работе использованы различные законы распределения случайных величин, позволившие получить более достоверные данные о времени выполнения всей работы. Результаты моделирования показывают, что в большинстве случаев послерейсовые операции, включающие подведение финансовых и правовых итогов рейса, могут быть завершены в короткие сроки. В то же время большая вариативность времени выполнения отдельных работ приводит к значительным задержкам исполнения исследуемых операций. Рассмотрен подход к оценке распределения времени выполнения операции, который предполагает разделение одной операции на совокупность действий, которые

выполняют соответствующие сотрудники компании. Доказано, что такое разделение позволит снизить трудоемкость сбора информации и выбора распределения времени выполнения отдельных работ.

Ключевые слова: сетевое планирование, имитационное моделирование, метод Монте-Карло, судоходная компания, танкер, демаредж, фрахтование, цифровизация, коммерческая работа, исследование операций.

Для цитирования:

Дьяконова М. Д. Оценка времени выполнения послерейсовых операций сотрудниками судовладельца методами имитационного моделирования / М. Д. Дьяконова, А. Д. Семенов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 5. — С. 884–893. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-884-893.

Введение (Introduction)

Использование цифровых технологий в различных отраслях экономики как в России, так и за рубежом приводит к появлению различных информационных и коммуникационных систем, предназначенных для решения комплекса задач в рамках какого-либо проекта [1]–[3]. Для создания эффективно работающих цифровых платформ применительно к работе в транспортной отрасли необходимо предварительно выполнить подробное описание работ, выполняемых при перевозке грузов. Такое описание используется в качестве технического задания для разработчиков информационных платформ.

Одним из ключевых участников процесса морской перевозки является судовладелец. Вместе с тем особенности коммерческой работы и выполнения отдельных операций подобных компаний делают их наиболее сложными для изучения. Именно поэтому в данной работе рассматриваются процессы, осуществляемые в судовладельческих компаниях. В основе предлагаемого исследования принимаются данные, полученные в процессе опроса сотрудников отечественной компании, владеющей танкерным флотом смешанного плавания.

В общем случае, весь комплекс мероприятий при перевозке грузов водным транспортом состоит из четырех блоков:

- 1) фрахтование судна;
- 2) часть рейса от момента передачи согласованных условий сделки в отдел эксплуатации флота и до момента убытия судна из порта погрузки;
- 3) часть рейса от момента убытия судна из порта погрузки до момента убытия судна из порта выгрузки;
- 4) подведение финансовых и правовых итогов рейса.

Подготовительным этапом перевозки водным транспортом является *процесс согласования и заключения условий контракта между судовладельцем и фрахтователем* [4]. Основная часть работ приходится на процесс транспортировки грузов, включающий обработку судна в порту, а также перемещение груза между портами погрузки и выгрузки. Заключительным этапом является работа по урегулированию всех взаиморасчетов между контрагентами, включая разрешение споров по претензиям, с последующим закрытием паспорта сделки в бухгалтерии. Процесс выполнения работ четвертого блока обычно скрыт для большинства участников перевозки, поэтому в научной литературе данный процесс не рассматривается с достаточной для разработки информационных систем точностью, основное внимание уделяется процессу перевозки [5]–[7]. В то же время оперативность решения послерейсовых задач оказывает существенное влияние на коммерческую деятельность судовладельческой компании. Это связано с высокой степенью неопределенности времени выполнения данных операций, так как вследствие конфликта интересов на стадии закрытия сделки зачастую существенно увеличивается время выполнения операций и, соответственно, появляется необходимость привлечения дополнительных затрат на судебные разбирательства, а также дополнительных человеческих ресурсов, которые позволят компании заниматься не только оперативной работой, но и разрешением конфликтов с клиентами.

Целью данной работы является формализация процедуры завершения рейса с коммерческой точки зрения, а также оценка распределения времени ее выполнения.

Для графического оформления процессов, выполняемых в исследуемом блоке работ, используется метод сетевого моделирования, где выполненное событие на схеме обозначается в виде круга, а работа — в виде стрелки [8], [9]. Особенностью сетевого моделирования является то, что именно работы требуют временных, технологических и человеческих затрат, в то время как события являются связующими звеньями между работами [10], [11].

Для оценки распределения времени выполнения работ используется метод Монте-Карло, поскольку, как отмечалось ранее, время выполнения отдельных операций в рассматриваемом блоке является случайной величиной [12], [13]. Суть данного метода заключается в моделировании большого числа статистических данных на основании принятых законов распределения случайных величин.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для создания сетевого графика вначале необходимо построить матрицу событий, где будет представлена последовательность событий, наступающих при подведении финансовых и правовых итогов рейса, а также определить время выполнения отдельных работ и выбрать распределения случайных величин. На практике процесс завершения рейса, с коммерческой точки зрения, осуществляется следующим образом. Процедура запускается после убытия судна из порта выгрузки. Для экипажа судна рейс считается завершенным, и все внимание концентрируется на новом рейсовом задании. Однако для офиса компании судовладельца и фрахтователя остается еще ряд работ, необходимых для своевременного исполнения. Первый вопрос, который всегда возникает после завершения рейса — это закрытие балансов по дисбурсментскому счету между судовладельцем и агентом в порту погрузки / выгрузки. Дисбурсментским счетом называют счет на обязательные портовые сборы, а также дополнительные работы, такие как снабжение, смена экипажа и другие работы, которые могут заказывать уполномоченные сотрудники судовладельческой компании в соответствии с регламентом.

Дисбурсментский счет бывает предварительным (PDA) и финальным (FDA). PDA обычно выставляется судовладельцу агентом перед тем, как судно зашло в порт. В соответствии с этим счетом судовладелец вносит предоплату в согласованном с агентом процентном соотношении (вплоть до 100 %). После убытия судна из порта агент формирует FDA, подкрепляя каждую статью затрат соответствующими счетами и квитанциями от портовых и прочих задействованных структур. Предполагается, что сумма PDA рассчитывается максимально точно и в идеальном случае полностью сходится с суммой FDA, так как за основу расчета принимаются официальные ставки портовых структур. Однако на практике такое встречается крайне редко. Как правило, сумма FDA отличается от суммы PDA в меньшую или большую сторону. В результате образуются суммы, требующие погашения. Скорость выставления FDA судовладельцу зависит от нескольких факторов: оперативности получения счетов от портовых структур; работы бухгалтерии агента; информации о том, в чью пользу и в каком размере образовалась оставшаяся сумма FDA к оплате. В среднем для закрытия предварительных дисбурсментских счетов финальными агенту требуется в среднем 14–30 сут., но в зависимости от указанных факторов FDA может присылаться быстрее либо с задержкой до 90 сут. с момента убытия судна из порта. После того как FDA получен судовладельцем, проводится тщательная проверка всех статей затрат и комплекта подтверждающих документов. Затем документы передаются в бухгалтерию, производятся соответствующие взаиморасчеты между судовладельцем и агентами, после чего данная задача считается выполненной.

Кроме работы с дисбурсментским счетом после завершения рейса также часто встречаются случаи урегулирования различных претензий, которые условно можно разделить на несколько видов, а именно:

- претензии по демереджу (и / или диспатчу, детеншену);
- претензии по недостатке и прочим штрафным санкциям со стороны фрахтователя;

– закрытие всевозможных возмещений (например, по бункеру, за таможенный транзит и другие виды в соответствии с условиями чартера).

Рассмотрим каждый вид более подробно. Обычно при эксплуатации танкерного флота применяется только демередж, поэтому процессы разрешения споров по диспатчу и детеншену здесь не рассматриваются, хотя имеют похожую схему выполнения. На основании условий чартера после завершения рейса оператор судна выполняет расчет контрсталийного времени. Если операции в порту погрузки / выгрузки были выполнены полностью в рамках стальной времени, т. е. контрсталийного времени не возникает, и сумма демереджа равна нулю, то претензия фрахтователю не выставляется, и данная задача считается решенной. Если судно по каким-либо причинам вышло на контрсталийное время, которое оценивается по ставке демереджа, то возникает некая сумма, подлежащая согласованию между сторонами чартера с последующей оплатой. Данный процесс длится в течение некоторого времени (в худшем случае растягивается на год и более). Тем не менее встречаются ситуации, когда весь процесс: от момента расчета суммы демереджа оператором судна до поступления денежных средств на счет судовладельца, занимает всего неделю.

Аналогичным образом решаются вопросы по возмещениям в рамках контракта. В случае, если имеют место возмещения по бункеру, затраченному, например, на подогрев груза в процессе перехода между портами, то оператором судна выполняется расчет понесенных затрат и далее сумма согласовывается с фрахтователем с последующей оплатой. Как правило, время урегулирования таких возмещений не занимает больше месяца. Возмещения иных расходов по дисбурментскому счету, расходам за транзит и другие процедуры выставляются фрахтователю в рамках контракта и подкрепляются подтверждающими документами.

Претензии по недостатке обычно направляются со стороны фрахтователя судовладельцу. Ведением таких претензий занимается страховой клуб (P&I) судовладельца. При этом время составления претензий и их обработка страховым клубом могут сильно варьироваться. Если со стороны судовладельца соблюден регламент оформления грузовых документов после выгрузки, то, как правило, такие претензии после согласования оплачиваются страховым клубом, при этом судовладелец несет только часть расходов по франшизе.

Для получения денежных средств судовладельцем (в частности, фрахт, возмещения по демереджу) казначей судовладельца направляет в банк копию действующего договора и таким образом открывает паспорт сделки. Срок действия договора контролируется казначеем и при необходимости юридически продлевается до тех пор, пока на счет компании не поступят все денежные средства по возмещениям. После того как все денежные средства по договору считаются полученными, паспорт сделки в банке закрывается. Оплата штрафных санкций судовладельцем осуществляется в соответствии с полученными счетами, и открытый паспорт сделки для этого не требуется. Поэтому рейс можно считать полностью завершённым после того, как судовладелец не только получит все возмещения, но и закроет свою часть взаиморасчетов с контрагентами в рамках договора по данному рейсу.

Логика выполнения работ, осуществляемых после завершения рейса судном вплоть до завершения судовладельцем всех взаиморасчетов между контрагентами, задействованными в перевозке, может быть описана в виде последовательности событий, приведенных в табл. 1.

Таблица 1

**Основные параметры сетевой модели
 подведения финансовых и правовых итогов рейса**

Описание события	Код начальной работы i	Продолжительность работы, сут.			Код конечной работы j
		min	mid	max	
Судно убыло из порта выгрузки	68	1; 1; 1	14; 14; 14	89; 90; 90	69,73, 74
Начало урегулирования претензий и возмещений	69	1; 3; 1	3;14; 3	7; 365; 7	70,76, 79
Демередж рассчитан, документы собраны	70	1	20	365	71

Окончание табл. 1

Демередж согласован сторонами	71	1	3	45	72
Закрываются взаиморасчеты по демереджу	72	1	14	30	82
Получен финальный дисбурсментский счет из порта погрузки	73	1	14	89	75
Получен финальный дисбурсментский счет из порта выгрузки	74	1	14	90	75
Вопросы по финальным дисбурсментским счетам согласованы	75	1	14	90	83
Получена претензия от фрахтователя по недостатке / прочим штрафным санкциям	76	1	3	7	77
Претензия передана в Р&I	77	7	30	365	78
Сумма претензии согласована	78	1	3	7	83
Перевыставление судовладельцем расходов по бункеру/ подогреву/дисбурсментскому счету и прочее согласно условиям договора	79	1	14	365	80
Сумма возмещения согласована	80	1	3	45	81
Закрываются взаиморасчеты по возмещениям	81	1	14	30	82
Паспорт сделки закрыт	82	1	14	90	83
Закрываются все взаиморасчеты между контрагентами в рамках данного рейса	83	—	—	—	—

Представленные в табл. 1 события позволяют построить сетевой график выполнения исследуемого комплекса работ (рис. 1).

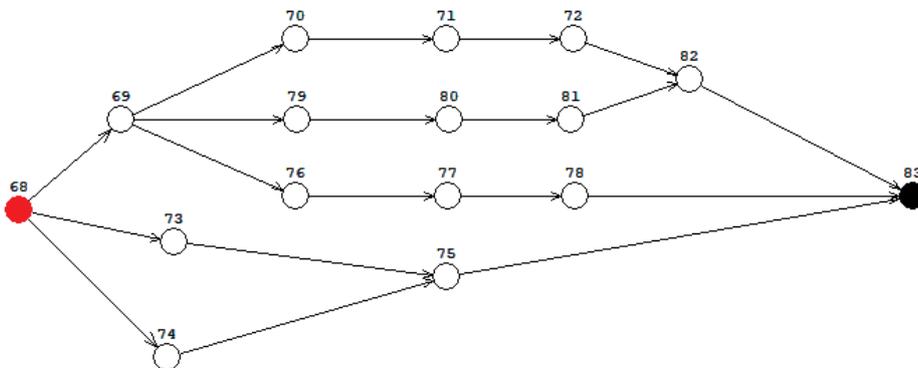


Рис. 1. Сетевой график 1 (базовый)

Полученный график позволяет провести оценку времени выполнения всего комплекса работ с учетом колебания случайных величин. Для этого необходимо построить математическую модель представленного сетевого графика. Примем следующие обозначения: — общее время выполнения всех работ, расположенных на пути i ; — время выполнения работы между событиями x и y . Всего на рис. 1 показано пять возможных путей, время которых определяется следующим образом:

$$T_1 = t_{68-69} + t_{69-70} + t_{70-71} + t_{71-72} + t_{72-82} + t_{82-83}; \quad (1)$$

$$T_2 = t_{68-69} + t_{69-76} + t_{76-77} + t_{77-78} + t_{78-83}; \quad (2)$$

$$T_3 = t_{68-69} + t_{69-79} + t_{79-80} + t_{80-81} + t_{81-82} + t_{82-83}; \quad (3)$$

$$T_4 = t_{68-73} + t_{73-75} + t_{75-83}; \quad (4)$$

$$T_5 = t_{68-74} + t_{74-75} + t_{75-83}. \quad (5)$$

В случае, когда все работы связаны логикой по «И», время выполнения всей процедуры определяется как максимум из этих величин:

$$T = \max \{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5\}. \quad (6)$$

Принятые распределения случайных величин представлены в табл. 2.

Таблица 2

Принятые распределения времени выполнения работ

Код работы	Распределение	Параметры
68,69	Нормальное	МО = 14; СКО = 4,2
69, 70	Нормальное	МО = 3; СКО = 0,9
70,71	Экспоненциальное	$\lambda = 0,02$
71,72	Нормальное	МО = 3; СКО = 0,9
72,82	Нормальное	МО = 14; СКО = 4,2
82,83	Нормальное	МО = 14; СКО = 4,2
68,73	Нормальное	МО = 14; СКО = 4,2
73,75	Нормальное	МО = 14; СКО = 4,2
75,83	Нормальное	МО = 14; СКО = 4,2
68,74	Нормальное	МО = 14; СКО = 4,2
74,75	Нормальное	МО = 14; СКО = 4,2
69,76	Экспоненциальное	Лямбда = 0,05
76,77	Нормальное	МО = 3; СКО = 0,9
77,78	Экспоненциальное	Лямбда = 0,05
78,83	Нормальное	МО = 3; СКО = 0,9
69,79	Нормальное	МО = 3; СКО = 0,9
79, 80	Экспоненциальное	Лямбда = 0,05
80,81	Нормальное	МО = 3; СКО = 0,9
81,82	Нормальное	МО = 14; СКО = 4,2

Результаты (Results)

Моделирование представленного процесса по методу Монте-Карло с учетом характеристик времени выполнения работ из табл. 1 позволяет получить вероятностные характеристики длительности изучаемого процесса, представленные на рис. 2.

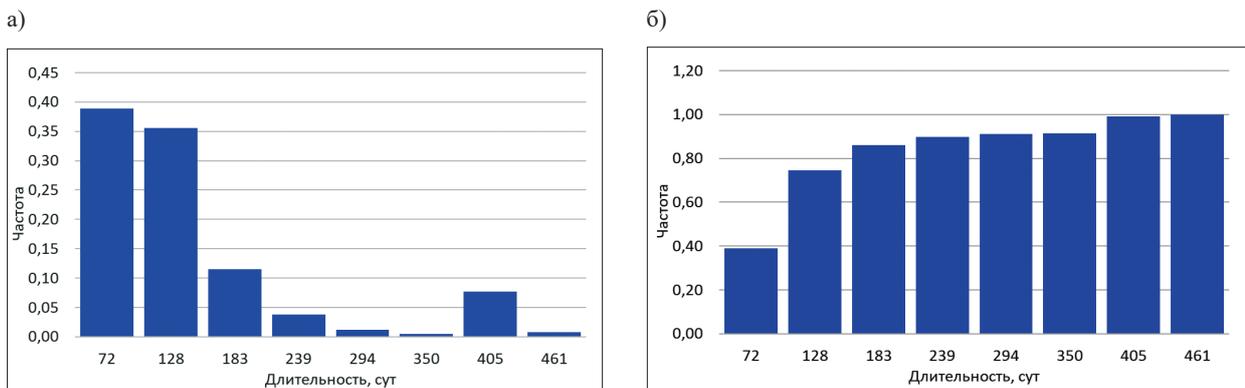


Рис. 2. Распределение времени (а) и интегральная функция (б) вероятности времени выполнения процесса

Таким образом, 39 % сделок будут завершены менее, чем за два месяца; 35 % — в период от двух до трех месяцев; еще 10 % — в период от трех до пяти месяцев, оставшиеся 16 % сделок потребуют значительно большего времени.

Обсуждение (Discussion)

Особенно сложной задачей в моделировании операционных процессов коммерческой деятельности является выбор распределения случайной величины, поскольку ряд операций выполняются параллельно различными компаниями и отделами, другие при этом могут быть сильно разделены во времени. Все это приводит к невозможности регистрации времени начала и окончания выполнения отдельной работы. В данном случае исследователь вынужден проводить опрос сотрудников и строить предположения о распределении времени выполнения тех или иных операций, подкрепляя свою неуверенность выражением Джорджа Бокса: «В сущности, все модели неправильны, но некоторые из них полезны». В то же время во многих случаях такой неопределенности удастся избежать путем усложнения описания операции. Все работы на сетевом графике представляют собой последовательность действий, каждое из которых требует определенного времени для его выполнения. Во многих случаях эти действия связаны некоторыми логическими элементами «если, то». Пример подобного описания операции дан на рис. 3.

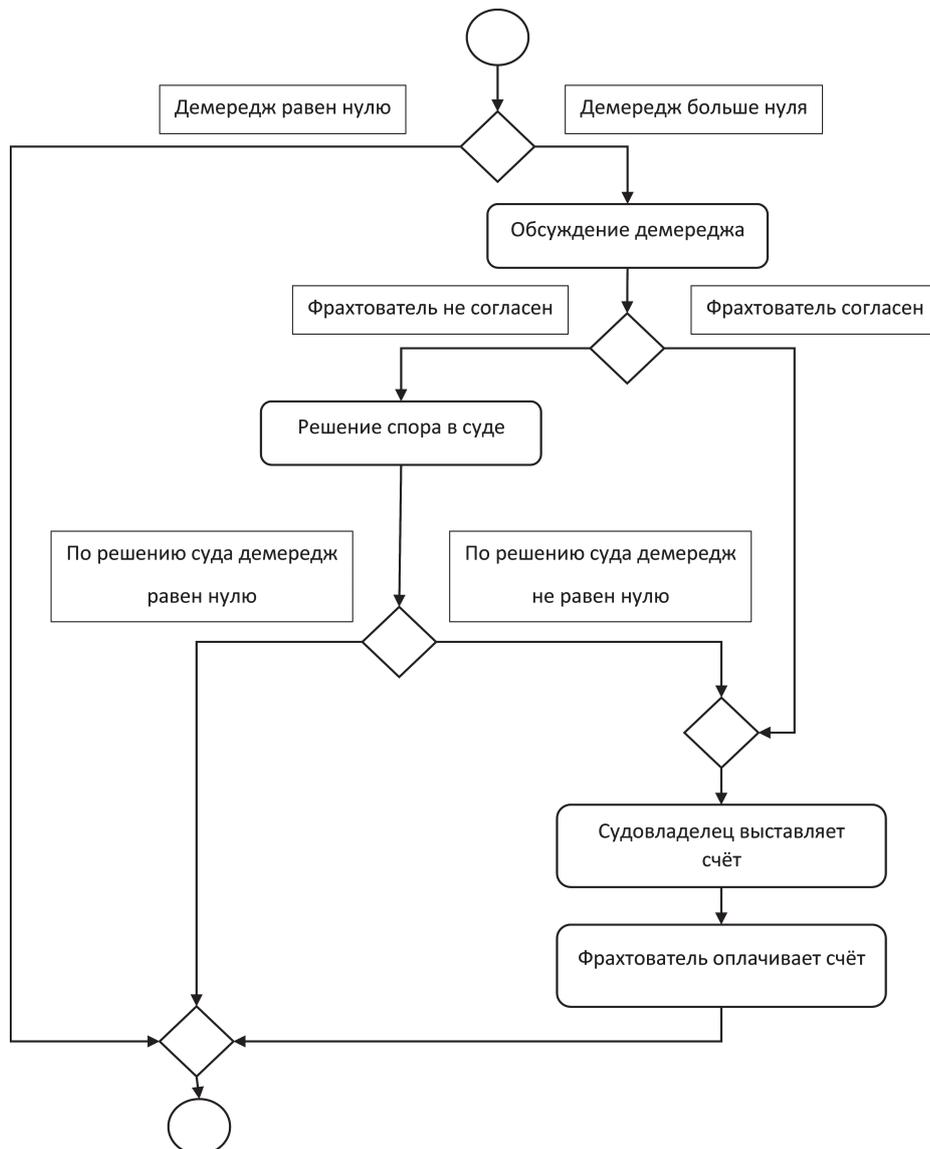


Рис. 3. Диаграмма процесса согласования демареджа

При этом менее продолжительным является само действие, тем проще получить данные о времени его выполнения. В результате дискретизируя работу, т. е. разделяя ее на все меньшие и меньшие составляющие, можно получить достоверные данные о времени ее выполнения (рис. 4).

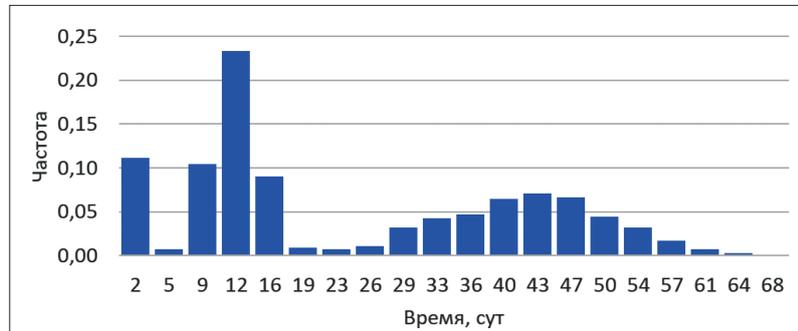


Рис. 4. Распределение работы для получения достоверных данных о времени ее выполнения

Полученные распределения могут быть использованы для оценки времени выполнения всего комплекса работ.

Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Структура процесса выполнения послерейсовых операций позволяет построить сетевой график данной процедуры и выполнить оценку времени ее выполнения с учетом колебания случайных величин при помощи метода имитационного моделирования.

2. Исходя из вероятностных характеристик длительности изучаемого процесса, полученных в результате имитационного моделирования, получается, что 39 % послерейсовых операций требуют на завершение около двух месяцев; 35 % — будут завершены в период от двух до трех месяцев; еще 10 % — в период от трех до пяти месяцев; а оставшиеся 16 % — потребуют значительно большего времени.

3. Усложнение описания операционных процессов коммерческой деятельности при помощи дискретизации работ на составляющие позволяет получить более точные данные о времени выполнения этих отдельных процедур, что, в свою очередь, позволяет более точно определить закон распределения случайной величины в целях моделировании всего комплекса работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства РФ от 28 июля 2017 года №1632-р. «Об утверждении программы «Цифровая экономика Российской Федерации» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://government.ru/docs/28653/> (дата обращения: 20.02.2020).

2. Белов В. Б. Новая парадигма промышленного развития Германии – стратегия «Индустрия 4.0» / В.Б. Белов // Современная Европа. — 2016. — № 5 (71). — С. 11–22. DOI: 10.15211/soveurope520164146.

3. Гончаренко Л. П. Цифровизация национальной экономики / Л. П. Гончаренко, С. А. Сыбачин // Вестник Университета. — 2019. — № 8. — С. 32–38. DOI: 10.26425/1816-4277-2019-8-32-38.

4. Дьяконова М. Д. Сетевое моделирование процесса фрахтования танкеров как элемент цифровизации коммерческой работы на водном транспорте / М. Д. Дьяконова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 504–514. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-504-514.

5. Zhai D. Optimization and Simulation on Tanker Vessels Scheduling for Efficient Terminal Operations / D. Zhai, X. Fu, H. Y. Xu, X. F. Yin, J. Vasundhara, W. Zhang, R. S. M. Goh // 2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). — IEEE, 2019. — Pp. 1486–1490. DOI: 10.1109/IEEM44572.2019.8978867.

6. *Rahimikelarijani B.* Simulation modeling of Houston Ship Channel vessel traffic for optimal closure scheduling / B. Rahimikelarijani, A. Abedi, M. Hamidi, J. Cho // *Simulation Modelling Practice and Theory*. — 2018. — Vol. 80. — Pp. 89–103. DOI: 10.1016/j.simpat.2017.10.004.
7. *Lobo B. J.* A transient stochastic simulation–optimization model for operational fuel planning in-theater / B. J. Lobo, D. E. Brown, M. S. Gerber, P. J. Grazaitis // *European Journal of Operational Research*. — 2018. — Vol. 264. — Is. 2. — Pp. 637–652. DOI: 10.1016/j.ejor.2017.06.057.
8. *Ehsan A.* State-of-the-art techniques for modelling of uncertainties in active distribution network planning: A review / A. Ehsan, Q. Yang // *Applied energy*. — 2019. — Vol. 239. — Pp. 1509–1523. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.01.211.
9. *Shi Q. J.* Experimental validation of network modeling method on a three-modular floating platform model / Q. J. Shi, H. C. Zhang, D. L. Xu, E. R. Qi, C. Tian, J. Ding, Y. S. Wu, Y. Lu, Z. W. Li // *Coastal Engineering*. — 2018. — Vol. 137. — Pp. 92–102. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2018.04.001.
10. *Кузнецов А. Л.* Матричный метод поиска путей на взвешенных ориентированных графах в задачах сетевого планирования при проектировании и эксплуатации морских портов / А. Л. Кузнецов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 230–238. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-230-238.
11. *Кузнецов А. Л.* Имитационное моделирование сетевых технологических процессов грузообработки в морских портах / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Д. Семенов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 526–536. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-526-536.
12. *Rubinstein R. Y.* Simulation and the Monte Carlo method / R. Y. Rubinstein, D. P. Kroese. — Third Edition. — John Wiley & Sons, Inc., 2016. — 432 p.
13. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. — М.: Юстиция, 2018. — 664 с.

REFERENCES

1. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 28 iyulya 2017 goda №1632-r. «Ob utverzhdanii programmy «Tsifrovaya ekonomika Rossiiskoi Federatsii». Web. 20 Feb. 2020.
2. Belov, V.B. New paradigm of industrial development of Germany – Strategy “Industry 4.0” // *Contemporary Europe* 5(71) (2016): 11–22. DOI: 10.15211/soveurope520164146.
3. Goncharenko, L.P., and S.A. Sybachin. “Digitalization of national economy.” *Vestnik universiteta* 8 (2019): 32–38. DOI: 10.26425/1816-4277-2019-8-32-38.
4. Diakonova, Mariia D. “Network modeling of the tankers chartering process as an element of commercial work digitalization in water transport.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.3 (2020): 504–514. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-504-514.
5. Zhai, Deqing, Xiuju Fu, Hai-Yan Xu, Xiao Feng Yin, Jayaraman Vasundhara, Wanbing Zhang, and Rick Siow Mong Goh. “Optimization and Simulation on Tanker Vessels Scheduling for Efficient Terminal Operations.” *2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*. IEEE, 2019. 1486–1490. DOI: 10.1109/IEEM44572.2019.8978867.
6. Rahimikelarijani, Behnam, Arash Abedi, Maryam Hamidi, and Jaeyoung Cho. “Simulation modeling of Houston Ship Channel vessel traffic for optimal closure scheduling.” *Simulation Modelling Practice and Theory* 80 (2018): 89–103. DOI: 10.1016/j.simpat.2017.10.004.
7. Lobo, Benjamin J., Donald E. Brown, Matthew S. Gerber, and Peter J. Grazaitis. “A transient stochastic simulation–optimization model for operational fuel planning in-theater.” *European Journal of Operational Research* 264.2 (2018): 637–652. DOI: 10.1016/j.ejor.2017.06.057.
8. Ehsan, Ali, and Qiang Yang. “State-of-the-art techniques for modelling of uncertainties in active distribution network planning: A review.” *Applied energy* 239 (2019): 1509–1523. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.01.211.
9. Shi, Q.J., H.C. Zhang, D.L. Xu, E.R. Qi, C. Tian, J. Ding, Y.S. Wu, Y. Lu, and Z.W. Li. “Experimental validation of network modeling method on a three-modular floating platform model.” *Coastal Engineering* 137 (2018): 92–102. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2018.04.001.
10. Kuznetsov, Aleksandr L. “Matrix method for finding the paths on weighted oriented graphs in the tasks of port net operational planning.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 230–238. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-230-238.

11. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Anton D. Semenov. "Simulation modelling for network technological processes of seaports cargo handling." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 12.3 (2020): 526–536. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12- 3-526-536.

12. Rubinstein, Reuven Y., and Dirk P. Kroese. *Simulation and the Monte Carlo method*. Third Edition. John Wiley & Sons, Inc., 2016.

13. Venttsel', E.S. *Teoriya veroyatnostei*. M.: Yustitsiya, 2018.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дьяконова Мария Дмитриевна — аспирант

Научный руководитель:

Кириченко Александр Викторович —

доктор технических наук, профессор

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

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

e-mail: mara.1990@yandex.ru

Семенов Антон Денисович — диспетчер

ООО «Логистический парк «Янино»»

Российская Федерация, Ленинградская область,

Всеволожский район, д. Янино-1,

Торгово-логистическая зона «Янино-1», № 1б

e-mail: asemyonov054@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Diakonova, Mariia D. — Postgraduate

Supervisor:

Kirichenko, Aleksandr 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: mara.1990@yandex.ru

Semenov, Anton D. — Dispatcher

Yanino Logistics Park LLC

Vsevolozhsky District, Yanino-1 village,

Trade and logistics zone Yanino-1, No. 1,

Leningrad Region, Russian Federation

e-mail: asemyonov054@gmail.com

Статья поступила в редакцию 9 октября 2020 г.

Received: October 9, 2020.

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-894-905

SPLINE INTERPOLATION FOR BUILDING THREE-DIMENSIONAL BATHYMETRIC MODELS AT CHARTING INLAND WATERWAYS

E. A. Ratner, A. I. Zaitsev, M. A. Kvasnoy

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

A modified method for compiling electronic navigational charts of the Russian Federation inland waterways is proposed in the paper. This method allows to significantly speed up the process by means of automated construction of digital terrain models of the bottom relief. The aim of the method is to reduce costs associated with creating and maintaining an up-to-date collection of electronic navigational charts at cartography departments and offices of the inland waterways Administrations. A continuous survey grid is required to build a digital terrain model of the bottom relief. Such a grid can be obtained using a multibeam echo sounder. However, inland waterway hydrographic operations are mainly conducted with single beam echo sounders. Depth values obtained from surveying with a single beam echo sounder always form an irregular grid. The frequency of depths measured in this way does not allow building three-dimensional models. Therefore, it is necessary to mathematically complete the relief of the waterway bottom. The densification of the depth grid can be done using mathematical interpolation. The methods of interpolation implemented in cartographic and geoinformation software, as well as methods used by cartographers when working manually are analyzed. The analysis has showed that an irregular grid is always used when working manually. As for the software, only interpolation methods based on calculations performed with a regular grid are used, since these methods are easier to implement and require less computing power. The downside is that these methods lead to significant errors. To build three-dimensional bathymetric models with the smallest deviation from the true values, the method of biquadratic spline interpolation on an irregular grid is proposed. Digital terrain models of the bottom relief are proposed to be used for inland waterway cartography to automatically place isobaths, simplify the placement of fairways, and provide additional visual control of the quality of survey work.

Keywords: electronic navigational chart, inland waterways, accuracy of depths values, digital terrain model, interpolation, spline interpolation, irregular grid, unmanned navigation.

For citation:

Ratner, Elizaveta A., Aleksei I. Zaitsev, and Maksim A. Kvasnoy. "Spline interpolation for building three-dimensional bathymetric models at charting inland waterways." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.5 (2020): 894–905. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-894-905.

УДК 528.06

СПЛАЙН-ИНТЕРПОЛЯЦИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ БАТИМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ КАРТОГРАФИРОВАНИИ ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЕЙ

Е. А. Ратнер, А. И. Зайцев, М. А. Квасной

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

В статье предлагается модифицированный метод создания электронных навигационных карт на внутренних водных путях Российской Федерации, позволяющий существенно ускорить процесс при помощи автоматизированного построения цифровых моделей рельефа дна. Целью предложенного метода является уменьшение затрат при создании и поддержании актуальной коллекции карт в картографических отделах и службах Администраций бассейнов внутренних водных путей. Отмечается, что для по-

строения цифровой модели рельефа дна необходима сплошная сеть промера. Подобную сеть можно получить при выполнении работ многолучевым эхолотом. Гидрографические работы на внутренних водных путях преимущественно выполняются одноструевыми эхолотами. Значения глубин, полученных при выполнении промерных работ при помощи оборудования такого типа, всегда образуют нерегулярную сеть. Обращается внимание на то, что частота глубин, измеренных таким образом, не позволяет строить трехмерные модели, поэтому возникает необходимость математически дотраивать рельеф поверхности дна водного пути. Сгущение сети глубин можно выполнить с помощью математической интерполяции. В статье проанализированы методы интерполяции, реализованные в картографических и геоинформационных программах, а также методы, применяемые специалистами-картографами при работе вручную. Анализ показал, что при работе вручную всегда используется нерегулярная сеть. В работе программного обеспечения применяются только методы интерполяции, основанные на расчетах по регулярной сети, поскольку их использование легче реализуемо и требует меньших вычислительных мощностей, но приводит к значительным погрешностям. Для построения трехмерных батиметрических моделей с наименьшими отклонениями от истинных значений авторами настоящего исследования предложен метод биквадратной сплайн-интерполяции на нерегулярной сети. В частности, предлагается цифровые модели рельефа дна использовать при картографировании ВВП для автоматизированного нанесения изобат, упрощения нанесения судового хода и дополнительного визуального контроля качества промерных работ.

Ключевые слова: электронная навигационная карта, внутренние водные пути, точность измерения глубин, цифровая модель рельефа дна, интерполяция, сплайн-интерполяция, нерегулярная сеть, безэкипажное судоходство.

Для цитирования:

Ратнер Е. А. Сплайн-интерполяция для построения трехмерных батиметрических моделей при картографировании внутренних водных путей / Е. А. Ратнер, А. И. Зайцев, М. А. Квасной // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 5. — С. 894–905. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-894-905.

Введение (Introduction)

Анализ современной гидрографической и картографической деятельности на внутренних водных путях (ВВП) Российской Федерации показывает, что гидрографические работы, которые на сегодняшний день частично автоматизированы, в полном объеме выполняются во всех администрациях бассейнов внутренних водных путей РФ (АБ ВВП). Однако полный цикл картографических работ, включающий создание электронных навигационных карт (ЭНК) в формате S-57, выполняют всего лишь четыре картографических отдела АБ ВВП из четырнадцати и картографическая служба Федерального государственного бюджетного учреждения «Канал имени Москвы».

Для развития картографических отделов и служб в АБ ВВП необходимо облегчить работу специалистов-картографов (например, частично автоматизировать производственный цикл создания ЭНК). Это позволит повысить надежность создаваемых картографических продуктов и даст возможность поддерживать уже созданную коллекцию электронных навигационных карт на уровне современности с наименьшими экономическими затратами. Для решения этих задач следует внедрить в процессы разработки и создания карт компьютерные технологии, а именно: экспертные системы, нейронные сети, системы распознавания образов, а также другие разделы искусственного интеллекта [1] и современные методы цифрового моделирования рельефа. Применение таких методов позволяет автоматизировать трудоемкие процессы создания различных типов карт, а также внести объективность в установлении положения характерных точек и линий рельефа [2].

Цифровые модели рельефа дна (ЦМР), построенные в автоматизированном режиме, позволяют облегчить выполнение картографических работ, в том числе нанесение судового хода при картографировании участков ВВП, не зарегулированных СНО, корректировку автоматически построенных изобат, а также контроль качества выполненных промерных работ. Кроме того, ЦМР можно применять как самостоятельный продукт для решения различных задач, начиная от простого анализа данных и заканчивая сложным комплексным моделированием [3]. К тому же батиметрические модели можно использовать в целях навигации, а также составлять на их основе трехмерные навигационные карты [4]. Актуальность применения ЦМР объясняется прежде всего тем, что такие модели предоставляют более наглядные и легко интерпретируемые данные,

они помогают наиболее полно передавать информацию об изменениях объектов и исследуемой среды с течением времени, а также позволяют реализовать ряд прикладных задач, для решения которых двухмерных данных недостаточно [5].

Трехмерное моделирование рельефа — это стандартная процедура, которая реализована во многих коммерческих и открытых геоинформационных системах (ArcGIS, GRASS и Surfer) и в универсальных математических пакетах (Matlab и Maple). Для построения трехмерных моделей (например, в программной среде ArcGIS, версия 10.3.1) предлагается проводить интерполяцию десятью различными способами [6]. В геоинформационных системах также реализованы еще более сложные подходы, в частности, перспективное панорамное трехмерное моделирование и плановое наклонное картографирование рельефа [7]. В современном программном обеспечении (ПО) для создания морских и речных карт (в частности, в ENC Designer) также реализована функция построения ЦМР, однако цифровые модели рельефа дна используются как самостоятельный продукт, а не в целях дальнейшего картографирования. Кроме того, необходимо учитывать, что процесс моделирования, как правило, проводится на основе ограниченного набора измерений, полученных по нерегулярной сети наблюдений [8], трансформируемой в регулярную. В результате точность построенной модели снижается.

Полученных данных при выполнении промерных работ с помощью однолучевого эхолота [9] для построения ЦМР недостаточно, так как предельно допустимое междугалсовое расстояние на водохранилищах, согласно данным, приведенным в таблице¹, может составлять до 500 м. Схема расположения галсов при выполнении работ показана на рис. 1. В такой ситуации необходимо с помощью математических методов дотраивать рельеф поверхности дна водного пути. При выполнении промерных работ с помощью многолучевого эхолота необходимость в сгущении сети отсутствует [10].

Рекомендованное и предельно допустимое междугалсовое расстояние при выполнении промерных работ на ВВП

Ширина участка, м	Масштаб съемки	Междугалсовое расстояние, м	Предельно допустимое междугалсовое расстояние, м
На перекатах			
До 100	1:2 000	10	20
100–300	1:5 000	25	50
	1:10 000	50	100
	1:25 000	100	125
На плесах			
до 100	1:2 000	20	40
100–300	1:5 000	50	100
Более 300	1:10 000	100	200
	1:25 000	200	250
	1:50 000	400	500

На рис. 1 видно, что глубины, полученные с помощью однолучевого эхолота (промер выполнен на р. Уфа), всегда образуют нерегулярную сеть.

Оптимальным методом для сгущения сети промера служит математическая интерполяция. Решения, предлагаемые в данной статье, найдены на основе ранее выполненных исследований точности моделей рельефа, построенных интерполяционными методами. Анализ точности цифровых моделей рельефа дна, построенных различными методами интерполяции, описан в работах европейских, австралийских и американских ученых [6], [9], [10], [11]–[15] и др. Однако ра-

¹ Отчет о выполнении работы по государственному контракту от 29 мая 2017 года № 107171030003-Р по теме: «Проведение комплекса работ по созданию и обновлению баз данных навигационной информации для картографического обеспечения внутренних водных путей с использованием сигналов навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС, перспективных глобальных навигационных спутниковых систем и их функциональных дополнений». Шифр: «Карта – Река». СПб: АО «Кронштадт», 2017. 90 с.

нее не рассматривался вопрос использования моделей рельефа дна при картографировании ВВП, а также построения трехмерных моделей на основе данных, полученных при выполнении промерных работ на ВВП с учетом их специфики.

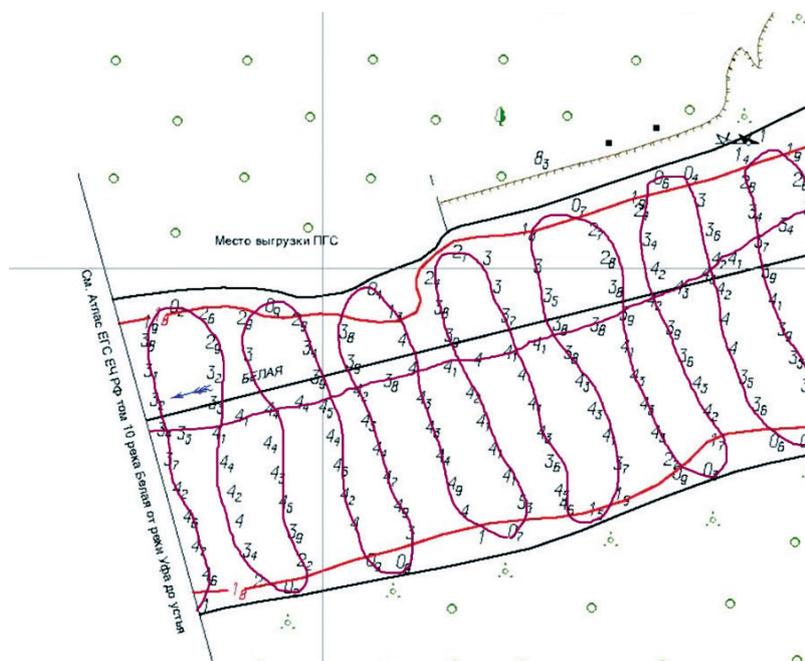


Рис. 1. Схема расположения галсов при выполнении гидрографических работ однолучевым эхолотом (масштаб 1:5 000)

Целью данного исследования является разработка метода частичной автоматизации картографического производства в АБ ВВП. В соответствии с целью исследования были поставлены и решены следующие задачи:

- анализ применяемых при картографировании ВВП сетей сгущения и методов интерполяции;
- подбор оптимального метода интерполяции;
- выполнение сгущения сети выбранным методом интерполяции;
- построение трехмерной цифровой модели;
- автоматизированное построение безопасной изобаты и нанесение судового хода.

Анализ методов нахождения промежуточных значений величин по имеющемуся дискретному набору глубин, используемых специалистами-картографами при ручной работе и в картографическом ПО, показал, что в работе в основном используются следующие классические методы.

1. *Интерполяция методом ближайшего соседа.* При использовании этого метода значение искомой глубины принимается равным значению ближайшей промеренной глубины [12]. При картографировании вручную данный метод не используется, а в некоторых программных продуктах глубина искомой точки принимается равной глубине, заданной в пикселе, в котором она размещена, что и является, по сути, интерполяцией методом ближайшего соседа на регулярной сети.

Формула для определения расстояния между двумя точками в двумерном пространстве (необходима для нахождения ближайшей точки):

$$\|ab\| = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}. \quad (1)$$

2. *Линейная и трилинейная интерполяция* — наиболее распространенные методы интерполяции, при использовании которых значение искомой точки принимается равным среднему значению двух ближайших точек на плоскости для линейной интерполяции и среднему значению двух

ближайших точек в трехмерном евклидовом пространстве — для трилинейной. Построение изобат в ряде картографических программ реализовано с помощью метода линейной интерполяции на регулярной сети, а построение изолиний вручную часто основывается на принципе методов как линейной, так и трилинейной интерполяций (соответственно без приведения сети к регулярному виду).

Линейная интерполяция — это интерполяция алгебраическим двучленом $f(x) = ax + b$, заданной в двух точках x_0 и x_1 отрезка $[a, b]$. Уравнение прямой с двумя заданными точками имеет вид:

$$\frac{y - f(x_0)}{f(x_1) - f(x_0)} = \frac{x - x_0}{x_1 - x_0}. \quad (2)$$

Соответственно для $x \in [x_0, x_1]$

$$f(x) \approx y = f(x_0) + \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}(x - x_0). \quad (3)$$

Трилинейная интерполяция — метод многомерной интерполяции в трехмерном пространстве:

$$f(x, y, z) \approx \frac{f(x_0, y_0, z_0)}{\Delta} k_1 + \frac{f(x_1, y_0, z_0)}{\Delta} k_2 + \frac{f(x_1, y_0, z_1)}{\Delta} k_3 + \frac{f(x_1, y_1, z_0)}{\Delta} k_4 + \frac{f(x_1, y_1, z_1)}{\Delta} k_5,$$

где

$$\Delta = (x_1 - x_0)(y_1 - y_0)(z_1 - z_0);$$

$$k_1 = (x_1 - x)(y_1 - y)(z_1 - z);$$

$$k_2 = (x - x_0)(y_1 - y)(z_1 - z);$$

$$k_3 = (x - x_0)(y_1 - y)(z - z_0);$$

$$k_4 = (x - x_0)(y - y_0)(z_1 - z);$$

$$k_5 = (x - x_0)(y - y_0)(z - z_0).$$

3. *Треугольная интерполяция* – метод многомерной интерполяции в трехмерном евклидовом пространстве. Данная интерполяция является расширением трилинейной интерполяции, при которой значения функции $f(x, y) = z$ интерполируются в искомой точке (x, y, z) в соответствии с известными значениями в окружающих трех точках. Обобщение основано на том, что искомая точка лежит не на линии, а внутри или на границе сформированного тремя известными точками треугольника. Треугольная интерполяция является расширением линейной интерполяции, действующей в пространстве. Построение изобат вручную иногда основывается на принципе метода треугольной интерполяции.

Искомая точка находится на пересечении медиан взятого за основу треугольника, т. е. в точке центра его масс (M) и рассчитывается по формулам:

$$M_x = \frac{a_x + b_x + c_x}{3}; \quad (5)$$

$$M_y = \frac{a_y + b_y + c_y}{3}; \quad (6)$$

$$M_z = \frac{a_z + b_z + c_z}{3}. \quad (7)$$

4. *Билинейная интерполяция* — это обобщение линейной интерполяции функций одной переменной для функции двух переменных, основанное на том, что искомая точка лежит не на линии, а внутри или на границе сформированного четырьмя известными точками прямоугольника, и обычная линейная интерполяция применяется последовательно в направлении четырех значений в углах четырехугольника, экстраполируя функцию на всю остальную поверхность. Принципы билинейной интерполяции часто используются при картографировании изолиний вручную.

Функция билинейной интерполяции имеет вид:

$$F(x, y) = a + bx + cy + dxy. \quad (8)$$

Интерполируемое значение функции $f(x, y)$ вычисляется по следующей формуле:

$$f(x, y) = \frac{f(x_1, y_1)}{\Delta} k_1 + \frac{f(x_1, y_2)}{\Delta} k_2 + \frac{f(x_2, y_1)}{\Delta} k_3 + \frac{f(x_2, y_2)}{\Delta} k_4, \quad (9)$$

где

$$\Delta = (x_1 - x_0)(y_1 - y_0);$$

$$k_1 = (x_1 - x)(y_1 - y);$$

$$k_2 = (x - x_0)(y_1 - y);$$

$$k_3 = (x_1 - x)(y - y_0);$$

$$k_4 = (x - x_0)(y - y_0).$$

Методы и материалы (Methods and Materials)

Рассмотренные ранее виды интерполяции, используемые в картографии, показывают, что при работе вручную специалисты-картографы всегда применяют для построения нерегулярную сеть, в то время как в работе современного картографического ПО реализованы только методы интерполяции, основанные на расчетах по регулярной сети. Это связано с тем, что использование регулярных сетей упрощает алгоритмы и сокращает расчеты, а, следовательно, оно легче реализуемо и требует меньших вычислительных мощностей ЭВМ. Нерегулярная сеть требует, как правило, больших вычислительных мощностей и более сложных алгоритмов, позволяя при этом сохранить точность. Обработка поверхности триангуляционной нерегулярной сети, из-за сложности ее структуры, несколько менее эффективна, чем обработка растровых данных, однако использование для расчетов регулярных сетей приводит к погрешностям, размер которых зависит от степени упрощения. Поэтому триангуляционные нерегулярные сети используются для моделирования небольших областей с очень высокой точностью, например, в инженерных приложениях [16]. Несмотря на сложность реализации, авторы данной статьи предлагают использовать в ПО для картографирования ВВП именно нерегулярную сеть.

Анализ применения различных методов интерполяции при построении батиметрических ЦМР выполнен в работах [6], [9]; [10], [15], [17], [18]. Поскольку результаты оценки точности моделирования показали, что интерполяция методом сплайнов (кусочно-полиномиальных функций) позволяет создавать ЦМР с наименьшими ошибками для различных условий рельефа, авторы указанных ранее работ предлагают использовать для расчетов *метод биквадратной сплайн-интерполяции*. Интерполяция сплайнами гарантирует сходимость и устойчивость вычислительного процесса, т. е. максимальную степень приближения найденных значений к истинным и минимальное отклонение от исходной функции на заданном промежутке, поскольку сплайн-функция интерполирует значения (x_i, y_i) набором функций, каждая из которых определена на интервале $[x_{i-1}, x_i]$. Биквадратная сплайн-интерполяция — это метод многомерной интерполяции в трехмерном евклидовом пространстве, при которой следующие значения функций:

$$f(x_1, y_1) = z_1, f(x_2, y_2) = z_2, f(x_3, y_3) = z_3, f(x_4, y_4) = z_4, \quad (10)$$

интерполируются в четырех искомым точках: $(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, x_3, y_3, z_3, x_4, y_4, z_4)$ в соответствии с известными значениями в окружающих девяти точках. Обобщение основано на том, что искомые точки лежат не на линии, а внутри четырех четырехугольников, граничащих друг с другом двумя ребрами и сформированных девятью известными точками. При условии, что четырехугольники не образуют явно невыпуклую триангуляцию (наружный угол, образованный в месте примыкания четырехугольников, должен быть больше $12,5^\circ$), по трем точкам, лежащим на каждом из внешних и центральных ребер, строятся квадратичные сплайн-функции и из полученных функций интерполируются значения в промежуточных точках (между узловыми точками). При соединении найденных точек образуются промежуточные ребра, на которых строятся квадратичные сплайн-функции и интерполируются значения в точках, равноудаленных от узловых точек. Построение биквадратной сплайн-интерполяции выполнено на рис. 2, где красным цветом показаны исходные точки и построенные на них четырехугольники, оранжевым — построенные сплайны, синим — полученные точки.

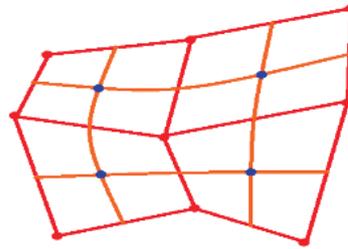


Рис. 2. Пример выполнения билинейной интерполяции

Функция биквадратной сплайн-интерполяции имеет вид:

$$f_i(x) = a_i + b_i x + c_i x^2; \quad (11)$$

$$f_i(y) = a_i + b_i y + c_i y^2.$$

Коэффициенты a, b, c находятся из системы уравнений:

$$\begin{cases} a_i + b_i x_1 + c_i x_1^2 = z_1; \\ a_i + b_i x_2 + c_i x_2^2 = z_2; \\ a_i + b_i x_3 + c_i x_3^2 = z_3. \end{cases} \quad (12)$$

После того как во всех возможных комбинациях, состоящих из четырех граничащих друг с другом двумя ребрами четырехугольников, образующих явно выпуклое множество, выполнена биквадратная интерполяция (полигоны, в которых выполнена интерполяция, помечаются и в дальнейшем отборе участие не принимают), в оставшихся четырехугольниках, из которых невозможно построить комбинацию, состоящую из четырех граничащих друг с другом двумя ребрами четырехугольников, выполняется билинейная интерполяция. Далее в оставшихся треугольниках выполняется треугольная интерполяция (данный метод интерполяции подробно описан выше). После того, как во всех полигонах интерполяция выполнена, все ранее расставленные метки снимаются.

Для расчетов можно использовать также бикубическую сплайн-интерполяцию, принцип которой аналогичен принципу биквадратной интерполяции, но выполняется не в четырех, а в девяти четырехугольниках. Однако в связи с тем, что формула для расчетов крайне громоздкая [19], а количество искомым комбинаций четырехугольников на нерегулярной сетке невелико, данный вид интерполяции не применяется.

Результаты (Results)

Выполнена биквадратная сплайн-интерполяция на участке р. Тавда. На рис. 3 приведен фрагмент промерного планшета р. Тавда. На рис. 4 показана ЦМР участка р. Тавда, построенная только на основе имеющихся промерных данных. Далее была выполнена биквадратная сплайн-интерполяция. На рис. 5 показан массив исходных батиметрических данных и батиметрических данных, полученных по результатам сгущения сети (массив исходных батиметрических данных показан красным цветом, массив батиметрических данных, полученных по результатам биквадратной сплайн-интерполяции — синим цветом).

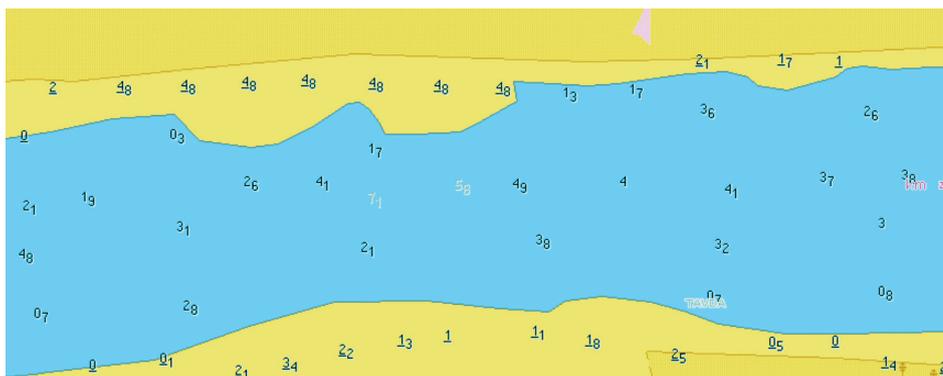


Рис. 3. Фрагмент промерного планшета р. Тавда в формате S-57

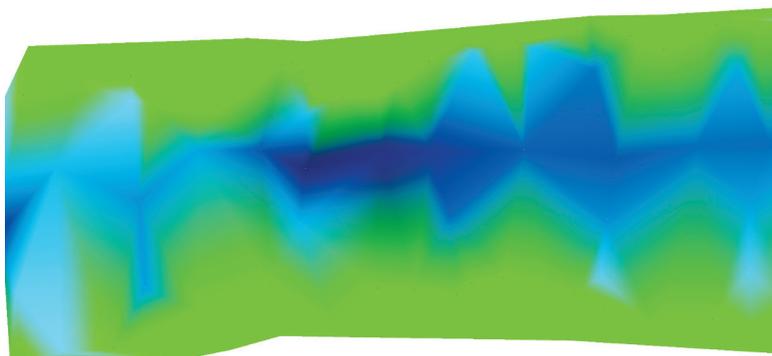


Рис. 4. Цифровая модель рельефа участка р. Тавда, построенная на основе имеющихся промерных данных

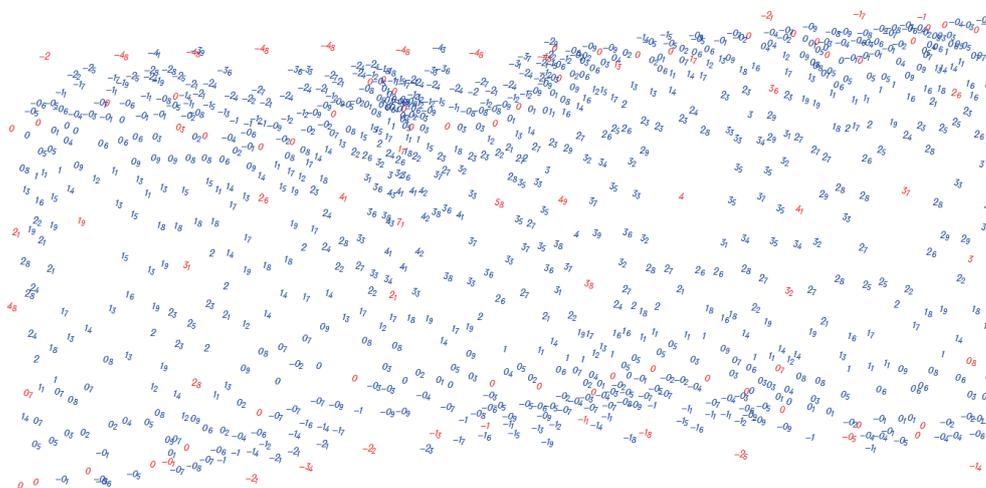


Рис. 5. Массив батиметрических данных, полученных по результатам биквадратной сплайн-интерполяции

Далее на основе полученной методом интерполяции сети построена цифровая батиметрическая модель. По полученным значениям глубин в автоматическом режиме построены изобаты. На рис. 6 показана ЦМР участка р. Тавда с автоматически рассчитанными и построенными изобатами на основе данных, интерполированных методом биквадратной сплайн-интерполяции

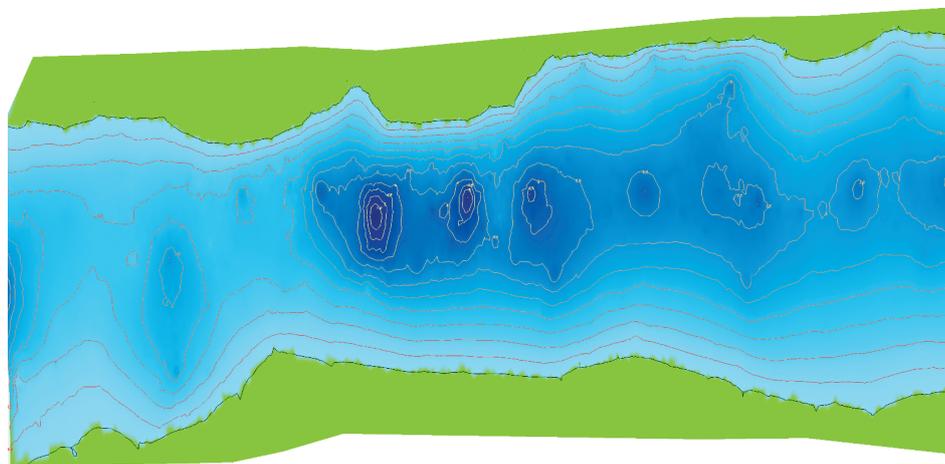


Рис. 6. Цифровая модель рельефа участка р. Тавда, построенная на основе сгущенной промерной сети

На основе полученной цифровой модели рассчитана безопасная изобата 1,2, по самым темным участкам которой проведен судовой ход. Полученные судовой ход и изобаты перенесены на ранее составленную электронную карту в формате S-57.



Рис. 7. Фрагмент ЭНК р. Тавда в формате S-57

На рис. 7 показана составленная ЭНК р. Тавда с автоматически построенной безопасной изобатой 1,2 м и судовой ходом, нанесенным по градиентной заливке ЦМР.

Обсуждения (Diskussion)

На рис. 7 видно, что применение цифровых моделей рельефа дна для картографирования ВВП позволило упростить работу специалистов-картографов и снизить время, затрачиваемое ими на создание ячеек ЭНК (изобаты построены автоматически, судовой ход проведен практически моментально).

Описание метода, предложенного в данной статье, публикуется впервые, ранее подобные исследования не проводились.

Выводы (Summary)

Выполненное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. На основе предложенной в данной работе биквадратной сплайн-интерполяции, с учетом деятельности картографических отделов и служб в АБ ВВП, можно сделать вывод о необходимости частичной автоматизации процесса создания ЭНК, поскольку она позволяет сократить время создания ЭНК и косвенно обеспечить поддержку существующей коллекции электронных навигационных карт на уровне современности, а также уменьшить экономические затраты и решить проблемы кадрового дефицита.

2. Одним из методов автоматизации картографических работ на ВВП служит построение цифровых моделей рельефа дна, что необходимо для автоматизированного нанесения изобат, упрощения нанесения судового хода и дополнительного визуального контроля качества промерных работ. Но поскольку для построения ЦВМ исходных данных, полученных с помощью однолучевого эхолота, недостаточно, необходимо выполнить сгущение сети, для этого предлагается выполнять интерполяцию.

3. Анализ методов интерполяции, применяемых для картографирования ВВП, показал, что при работе вручную специалисты-картографы всегда проводят интерполяцию на нерегулярной сети, однако работа выполняется «на глаз»; в специальном картографическом ПО, напротив, реализованы методы интерполяции, основанные на математических законах, однако для сгущения сети используется упрощенная регулярная сеть.

4. Предложенный в статье метод сплайн-интерполяции для построения ЦМР, который может быть легко реализуемым в ПО и выполняемым на нерегулярной сети, позволит сохранить точность изначально заданного промера и обеспечить в дальнейшем безопасность судоходства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанченко А. Л. Современные технологии обработки и представления пространственных данных / А. Л. Степанченко, К. С. Лотова, В. В. Шлапак, И. И. Лонский // Информация и космос. — 2019. — № 1. — С. 139–142.

2. Павлова А. И. Применение методов цифрового моделирования рельефа для создания карт пластики / А. И. Павлова // Сборник научных трудов XII Международной научной конференции «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации». — 2015. — С. 279–281.

3. Sebecauer T. Processing digital terrain models by regularized spline with tension: tuning interpolation parameters for different input datasets / T. Sebecauer, J. Hofierka, M. Suri // Proceedings of the Open source GIS-GRASS users conference. — 2002. — Pp. 123–134.

4. Прохоренков А. А. Использование трехмерных навигационных карт для повышения безопасности судоходства по внутренним водным путям / А. А. Прохоренков // International Journal of Advanced Studies. — 2019. — Т. 9. — № 1. — С. 26–49. DOI: 10.12731/2227-930X-2019-1-26-49.

5. Майоров А. А. Перспективы развития компьютерных технологий создания цифровых моделей рельефа / А. А. Майоров, Т. К. Нгуен // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. — 2011. — № 4. — С. 107–110.

6. Alcaras E. Interpolation single beam data for sea bottom GIS modelling / E. Alcaras, L. Carnevale, C. Parente // International Journal of Emerging Trends in Engineering Research. — 2020. — Vol. 8. — No. 2. — Pp. 591–597. DOI: 10.30534/ijeter/2020/50822020.

7. Флоринский И. В. Трехмерное моделирование рельефа: применение пакета Blender / И. В. Флоринский, С. В. Филиппов // ИнтерКарто. ИнтерГИС. — 2018. — Т. 24. — № 2. — С. 250–261. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-250-261.

8. Митюнина И. Ю. Особенности создания цифровых моделей геофизических полей геостатическими методами / И. Ю. Митюнина // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. — 2019. — № 2 (39). — С. 236–240.

9. Parente C. Interpolation of Single Beam Echo Sounder Data for 3D Bathymetric Model / C. Parente, A. Valerio // International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering. — 2019. — Vol. 10. — No. 10. — Pp. 6–13.

10. Amante C. J. Accuracy of interpolated bathymetry in digital elevation models / C. J. Amante, B. W. Eakins // *Journal of Coastal Research*. — 2016. — Is. 76. — Pp. 123–133. DOI: 10.2112/SI76-011.
11. Chaplot V. Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density / V. Chaplot, F. Darboux, H. Bourennane, S. Leguédois, N. Silvera, K. Phachomphon // *Geomorphology*. — 2006. — Vol. 77. — Is. 1–2. — Pp. 126–141. DOI: 10.1016/j.geomorph.2005.12.010.
12. Li J. A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists / J. Li, A. D. Heap. — Canberra, Australia: Commonwealth of Australia, 2008. — 137 p.
13. Erdogan S. A comparison of interpolation methods for producing digital elevation models at the field scale / S. Erdogan // *Earth surface processes and landforms*. — 2009. — Vol. 34. — Is. 3. — Pp. 366–376. DOI: 10.1002/esp.1731.
14. Guo Q. Effects of topographic variability and lidar sampling density on several DEM interpolation methods / Q. Guo, W. Li, H. Yu, O. Alvarez // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. — 2010. — Vol. 76. — Is. 6. — Pp. 701–712. DOI: 10.14358/PERS.76.6.701.
15. Wu C.-Y. Comparison of different spatial interpolation methods for historical hydrographic data of the lowermost Mississippi River / C.-Y. Wu, J. Mossa, L. Mao, M. Almulla // *Annals of GIS*. — 2019. — Vol. 25. — Is. 2. — Pp. 133–151. DOI: 10.1080/19475683.2019.1588781.
16. Руководство пользователя ArcGIS [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/extensions/3d-analyst/fundamentals-of-3d-surfaces.htm> (дата обращения: 12.05.2020).
17. Amante C. J. Estimating coastal digital elevation model uncertainty / C. J. Amante // *Journal of Coastal Research*. — 2018. — Vol. 34. — Is. 6. — Pp. 1382–1397. DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-17-00211.1.
18. Павлова А. И. Анализ методов интерполирования высот точек для создания цифровых моделей рельефа / А.И. Павлова // *Автометрия*. — 2017. — Т. 53. — № 2. — С. 86–94. DOI: 10.15372/AUT20170210.
19. Wang K. A study of cubic spline interpolation / K. Wang // *InSight: Rivier Academic Journal*. — 2013. — Vol. 9. — Is. 2. — Pp. 1–15.

REFERENCES

1. Stepanchenko, A. L., K. S. Lotova, V. V. Shlapak, and I. I. Lonskii. “Sovremennye tekhnologii obrabotki i predstavleniya prostranstvennykh dannyykh.” *Informatsiya i kosmos* 1 (2019): 139–142.
2. Pavlova, A. I. “Primenenie metodov tsifrovogo modelirovaniya rel’efa dlya sozdaniya kart plastiki.” *Sbornik nauchnykh trudov XII Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Sovremen-nye instrumental’nye sistemy, informatsionnye tekhnologii i innovatsii»*. 2015. 279–281.
3. Cebebauer, Tomas, Jaroslav Hofierka, and Marcel Suri. “Processing digital terrain models by regularized spline with tension: tuning interpolation parameters for different input datasets.” *Proceedings of the Open source GIS-GRASS users conference*. 2002. 123–134.
4. Prokhorenkov, Andrei Aleksandrovich. “Use of three-dimensional navigation charts to improve inland waterways navigation safety.” *International Journal of Advanced Studies* 9.1 (2019): 26–49. DOI: 10.12731/2227-930X-2019-1-26-49.
5. Maiorov, A. A., and T. K. Nguen. “Perspektivy razvitiya komp’yuternykh tekhnologii sozdaniya tsifrovyykh modelei rel’efa.” *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotos”emka* 4 (2011): 107–110.
6. Alcaras, Emanuele, Luigi Carnevale, and Claudio Parente. “Interpolating single-beam data for sea bottom GIS modelling.” *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research* 8.2 (2020): 591–597. DOI: 10.30534/ijeter/2020/50822020.
7. Florinsky, Igor V., and Sergey V. Filippov. “Three-dimensional terrain modeling: application of the blender package.” *Proceedings of the International conference “InterCarto. InterGIS”* 24.2 (2018): 250–261. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-250-261.
8. Mitiunina, I. Iu. “Special aspects of geostatistical modeling of geophysical fields.” *Geologiya i poleznye iskopaemye Zapadnoy Urala* 2(39) (2019): 236–240.
9. Parente Claudio, and Andrea Vallario. “Interpolation of Single Beam Echo Sounder Data for 3D Bathymetric Model.” *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering* 10.10 (2019): 6–13.
10. Amante, Christopher J., and Barry W. Eakins. “Accuracy of interpolated bathymetry in digital elevation models.” *Journal of Coastal Research* 76 (2016): 123–133. DOI: 10.2112/SI76-011.
11. Chaplot, Vincent, Frédéric Darboux, Hocine Bourennane, Sophie Leguédois, Norbert Silvera, and Kongkeo Phachomphon. “Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation mo-

dels in relation to landform types and data density.” *Geomorphology* 77.1–2 (2006): 126–141. DOI: 10.1016/j.geomorph.2005.12.010.

12. Li, Jin, and Andrew D. Heap. *A review of spatial interpolation methods for environmental scientists*. Canberra, Australia: Commonwealth of Australia, 2008.

13. Erdogan, Saffet. “A comparison of interpolation methods for producing digital elevation models at the field scale.” *Earth surface processes and landforms* 34.3 (2009): 366–376. DOI: 10.1002/esp.1731.

14. Guo, Qinghua, Wenkai Li, Hong Yu, and Otto Alvarez. “Effects of topographic variability and lidar sampling density on several DEM interpolation methods.” *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 76.6 (2010): 701–712. DOI: 10.14358/PERS.76.6.701.

15. Wu, Chia-Yu, Joann Mossa, Liang Mao, and Mohammad Almulla. “Comparison of different spatial interpolation methods for historical hydrographic data of the lowermost Mississippi River.” *Annals of GIS* 25.2 (2019): 133–151. DOI: 10.1080/19475683.2019.1588781.

16. Rukovodstvo pol’zovatelya ArcGIS. Web. 12 May 2020 <<https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/extensions/3d-analyst/fundamentals-of-3d-surfaces.htm>>.

17. Amante, Christopher J. “Estimating coastal digital elevation model uncertainty.” *Journal of Coastal Research* 34.6 (2018): 1382–1397. DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-17-00211.1.

18. Pavlova, A. I. “Analysis of elevation interpolation methods for creating digital elevation models.” *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* 53.2 (2017): 171–177. DOI: 10.3103/S8756699017020108.

19. Wang, Kai. “A study of cubic spline interpolation.” *InSight: Rivier Academic Journal* 9.2 (2013): 1–15.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ратнер Елизавета Аркадьевна — аспирант
 Научный руководитель:
 Зайцев Алексей Иванович
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: elizaveta.a.ratner@gmail.com,
kaf_svvp@gumrf.ru
Зайцев Алексей Иванович —
 кандидат технических наук, капитан дальнего
 плавания, генеральный директор;
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 ООО «Научно-промышленное предприятие
 «Маринерус»
 198207, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 Ленинский пр., 199, лит. Б, офис 1
 e-mail: kaf_svvp@gumrf.ru, zaliv@bk.ru
Квасной Максим Андреевич —
 программист
 Отраслевой центр разработки и внедрения
 информационных систем
 107078, Российская Федерация, Москва, ул.
 Каланчевская, 13
 e-mail: maksim.kvasnoy@ocrv.ru

Ratner, Elizaveta A. — Postgraduate
 Supervisor:
 Zaitsev, Aleksei I.
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
 Russian Federation
 e-mail: elizaveta.a.ratner@gmail.com,
kaf_svvp@gumrf.ru
Zaitsev, Aleksei I. —
 PhD,
 Sea Captain, G.M.
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
 Russian Federation
 Scientific industrial enterprise
 “Marinerus”, Ltd.
 199/B Leninskii Av., St. Petersburg, 198207,
 Russian Federation
 e-mail: kaf_svvp@gumrf.ru, zaliv@bk.ru
Kvasnoy, Maksim A. —
 Software developer
 Industry Center for Information systems development
 and implementation
 13 Kalachevskaya Str., Moscow, 107078,
 Russian Federation
 e-mail: maksim.kvasnoy@ocrv.ru

Статья поступила в редакцию 27 августа 2020 г.
 Received: August 27, 2020.

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-906-914

METHODOLOGICAL APPROACHES TO THE DESIGN OF MARINE VESSELS WITH THE USE OF MATHEMATICAL MODELS OF A COMPREHENSIVE INDICATOR AND RISK ASSESSMENTS

M. A. Moskalenko, I. B. Druz, V. M. Moskalenko

MSU named after adm. G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Russian Federation

The process of designing a modern vessel is a rather complex non-linear task, requiring compliance with a number of restrictions set by the international conventions and prospects of the shipping market for a normative 25-year operation period. Any complex engineering structure for construction requires sketch, technical, working and technological projects. The simple dimensional modernization of convention ships projects, in order to improve the utilization rate of displacement by deadweight and save costs on economies of scale, is no longer able to meet the needs of the shipping market. Obviously, the classic approaches to the design of prototype ships, taking into account conventional measurements, should be substantially changed and revised on the basis of new principles for the use of basic elements of quality indicators. Therefore, only the design solution, which is based on modern development of techniques and technologies, can be implemented. At the same time, the main task of design remains the same and is connected, first of all, with the definition of the main elements of the projected vessel (displacement, main dimensions, coefficients of completeness of the theoretical drawing, characteristics of stability, buoyancy, strength and propulsion qualities). However, in modern initial equations, there are many arbitrary parameters, leading to a significant amount of uncertainty in the choice of optimal solutions. The methodological approaches to the design of marine transport vessels, based on new basic principles that reduce the uncertainty of calculations, taking into account the comprehensive quality indicator and formalized safety assessment are examined in the paper. The resulting patterns and conclusions can be used to prepare a technical task for the design and improvement of the fleet composition of shipping companies in the near future.

Keywords: design, formalized safety assessment, comprehensive indicator of the vessel quality.

For citation:

Moskalenko, Mikhail A., Ivan B. Druz, and Vladislav M. Moskalenko. "Methodological approaches to the design of marine vessels with the use of mathematical models of a comprehensive indicator and risk assessments." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.5 (2020): 906–914. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-906-914.

УДК 629.5.017

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ МОРСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СУДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ И ОЦЕНОК РИСКА

М. А. Москаленко, И. Б. Друзь, В. М. Москаленко

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

Отмечается, что процесс проектирования современного судна — достаточно сложная нелинейная задача, требующая соблюдения ряда ограничений, установленных международными конвенциями и перспективами судоходного рынка на нормативный 25-летний период эксплуатации. Любое сложное инженерное сооружение для постройки требует выполнения эскизного, технического, рабочего и технологического проектов. Простая размерная модернизация проектов судов конвенционных типов с целью улучшения коэффициента утилизации водоизмещения по дедвейту и экономии издержек в результате достижения «эффекта масштаба» уже не способна обеспечить потребности судоходного рынка. Очевидно, классические подходы к проектированию судов по прототипу с учетом условных измерителей должны

быть существенно изменены и пересмотрены на основе новых принципов использования базовых элементов показателей качества. Следовательно, может быть реализовано лишь то проектное решение, которое строится на базе современного развития техники и технологии. При этом главная задача проектирования остается прежней и связана в первую очередь с определением основных элементов проектируемого судна (водоизмещения, главных размерений, коэффициентов полноты теоретического чертежа, характеристик остойчивости, плавучести, прочности и ходкости). Тем не менее в современных исходных уравнениях существует достаточно много произвольных параметров, что приводит к значительной доле неопределенности выбора оптимальных решений. В статье рассматриваются методологические подходы к проектированию морских транспортных судов, основанные на новых базовых принципах, снижающих неопределенность расчетов с учетом комплексного показателя качества и формализованной оценки безопасности. Полученные закономерности и выводы могут быть использованы для подготовки технического задания на проектирование в целях совершенствования состава флота судоходных компаний на ближайшую перспективу.

Ключевые слова: проектирование, формализованная оценка безопасности, комплексный показатель качества судна.

Для цитирования:

Москаленко М. А. Методологические подходы к проектированию морских транспортных судов с использованием математических моделей комплексного показателя и оценок риска / М. А. Москаленко, И. Б. Друзь, В. М. Москаленко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 5. — С. 906–914. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-906-914.

Введение (Introduction)

В последнее десятилетие с учетом развития внешней торговли и судоходного рынка происходит прогрессивное развитие судостроительной науки. В настоящее время проектируются суда значительных размерений (например, мегаконтейнеровозы на 23,756 ДФЭ), для которых оптимизируются издержки перевозки на основе использования *эффекта масштаба*. Суда строятся с высокой степенью энергоэффективности (с двигателями на сжиженном природном газе (СПГ)) и автоматизации, что в дальнейшем позволит обеспечить внедрение на рынке морских перевозок автономных и полуавтономных судов (типа MASS по классификации ИМО). По прогнозам специалистов, уже в ближайшие годы полностью изменятся технологии доставки грузов морем и произойдут революционные изменения в судостроении [1].

В настоящее время частично обновлены суда типа *река – море* и ускоренными темпами идет обновление флота судов ледового плавания для обслуживания северных месторождений [2], [3]. Строятся суда ледового плавания высоких арктических классов двойного действия [3], [4], адаптированные для работы во льдах, но значительно проигрывающие конкурентам при работе в обычных морских условиях плавания по экономическим показателям и энергоэффективности. Следует отметить, что «Программа возрождения торгового флота России 1993–2000 гг.» не дала ожидаемого результата. Так, по данным Российского морского регистра судоходства, средний возраст судов под Российским флагом составляет более 26 лет, каботажный флот, используемый в основном на северный завоз, состоит из универсальных судов и танкеров с возрастом значительно превышающим нормативные сроки службы (примерно в 1,2–1,6 раза) [4], [5]. Поэтому у России появился уникальный шанс по обновлению отечественного флота, которое необходимо проводить на основе использования современных научно-технологических принципов для создания новых типов судов «на перспективу», позволяющих занять к 2030 г. лидирующие позиции на рынке морских перевозок в соответствии с международными требованиями по безопасности мореплавания [2], [6]. При этом основные направления развития и совершенствования флота должны сводиться к следующему:

- улучшение структурного состава флота;
- обеспечение соответствия новых типов судов условиям эксплуатации на основных направлениях перевозок;
- увеличение грузоподъемности, грузоместимости, скорости и энергоэффективности;

– пополнение флота специализированными судами ледового плавания арктических классов с малой осадкой, обеспечивающей возможность захода в устья сибирских рек, и двухосадочными ледоколами;

– приведение архитектурно-конструктивного типа и грузовых характеристик судов в соответствие с изменяющейся технологией и организацией обработки грузов в портах и портопунктах;

– повышение производительности труда судового экипажа и эффективности работы судна за счет внедрения энергоэффективных двигателей и движителей, комплексной автоматизации управления судном, а также оснащения судов современными системами, устройствами и энергетическими установками (например, оборудование судов ледового плавания двойного действия винторулевыми колонками типа Azipod и двухтопливными главными двигателями с переводом на электродвижение [7], [8]);

– создание на основе декларируемых принципов автономных и полуавтономных судов типа MASS (в определении ИМО — морское автономное надводное судно) с энергетическими установками, работающими на энергоэффективном экологичном топливе.

Вполне очевидно, что для практической реализации этих перспективных направлений необходимо знать значения критериев, определяющих прогрессивное развитие нового поколения судов торгового флота [9], [10]. При изучении этой проблемы необходимо отметить некоторые особенности ее решения в XXI в. Прежде всего, учитывая резкий рост рынка специализированных судов, следует считать неприемлемой ориентацию на образцы мирового судостроения, поскольку эта парадигма экономии издержек, базирующаяся на использовании эффекта масштаба, при простой размерной модернизации существующих проектов содержит опасность запрограммированной постройки для отечественного флота неконкурентоспособных судов с двигателями и дизель-генераторами, несущими в себе экологические риски, и корпусами значительной длины (более 350 м), несущими в себе риски преждевременной потери конструктивной безопасности. Данное обстоятельство вызвано, на наш взгляд, ошибками однокритериальной оптимизации коэффициентов утилизации водоизмещения по дедвейту.

Более прагматично при проектировании новых судов использовать методологию, отвечающую гипотезе о законе прогрессивной эволюции техники [10], в соответствии с которой переход от поколения «старых» судов к поколению «новых» связан с изменением критериев, характеризующих развитие рынка морских перевозок. При исчерпании возможностей нового типа судна происходит поиск перехода на новый, более прогрессивный тип движителей и использование современных энергоэффективных экологических силовых и энергетических установок.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Исследования динамики изменения основных характеристик судов конвенционных типов [5] позволили модифицировать математическую модель комплексного показателя $K_{\text{кп}}$ качества судов, отобрав в матрицу [A] существенные критерии качества и в матрицу [C] уникальные критерии качества, присущие соответствующему типу судна (табл. 1), что позволило выявить закономерность изменения этого критерия под воздействием различных факторов. Оказалось, что значения $K_{\text{кп}}$ для большинства типов судов изменяются, в соответствии с математической моделью, заданной:

$$K_{\text{кп}} = \frac{A}{1+10^z} + C. \quad (1)$$

Здесь $z = a + bx$; A и C — обобщенные критерии качества судна; a и b — параметры модели приведения к нормативному возрасту судна; $x = m(T_i - T_0)$; $m = 1/T$; T — продолжительность изучаемого периода, годы; $T = T_k - T_0$; T_0 , T_i и T_k — соответственно начальный, текущий и конечный годы изучаемого периода.

Для судов отдельных типов значения параметров модели приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 1

Среднестатистические значения комплексного показателя $K_{кп}$ качества отдельных типов судов российского флота, построенных в период 1970–2019 гг.

T_i годы	x	Рефрижераторные суда	Балкеры	Танкеры	Универсальные суда для ген. грузов	Лесовозы
1970	0	0,367	0,400	0,500	0,425	0,433
1975	1	0,384	0,433	0,517	0,445	0,450
1980	2	0,400	0,467	0,533	0,467	0,467
1985	3	0,450	0,500	0,550	0,488	0,488
1990	4	0,500	0,533	0,567	0,500	0,500
1995	5	0,517	0,550	0,650	0,5337	0,51
2000	6	0,533	0,567	0,733	0,567	0,533
2005	7	0,600	0,584	0,750	0,588	0,550
2010	8	0,667	0,600	0,767	0,600	0,567
2015	9	0,684	0,633	0,800	0,617	0,588
2019	10	0,700	0,667	0,833	0,633	0,600

Таблица 2

Параметры модели, описывающей динамику развития транспортных судов, построенных в период 1970–2019 гг.

№ п/п.	Типы судов	A	C	a	b
1	Рефрижераторные суда	0,700	0,360	1,732	-0,198
2	Балкеры	0,667	0,360	1,106	-0,110
3	Танкеры	0,833	0,467	1,467	-0,152
4	Универсальные суда для ген. грузов	0,633	0,440	1,488	-0,141
5	Лесовозы	0,600	0,420	0,940	-0,122

Таблица 3

Параметры модели, описывающей динамику развития транспортных судов, построенных после 2000 г.

№ п/п.	Типы судов	A	C	a	b
1	Рефрижераторные суда	0,260	0,700	1,732	-0,198
2	Балкеры	0,220	0,667	1,106	-0,110
3	Танкеры	0,150	0,833	1,467	-0,152
4	Универсальные суда для ген. грузов	0,245	0,633	1,488	-0,141
5	Лесовозы	0,290	0,600	0,940	-0,122

Результаты (Results)

В целом собранные и проанализированные материалы позволяют синтезировать модели судов, отражающих новый этап развития судостроения. Прежде всего новое поколение морских судов должно адекватно отвечать на появление новых типов движителей и двигателей (например, работающих на сжиженном природном газе), гибридных силовых установок, судов высоких арктических классов значительных размерений (более 300 м) и судов двойного действия существенным изменением критерия комплексного показателя качества $K_{кп}$. Такие изменения вызовут прежде всего смещение положения начала координат в шкале оценки всех свойств судна и видоизменят сами свойства. В качестве примера приведем свойства судна, характеризующие корпус H , источники внешней и внутренней энергии, соответственно, MP и MO , движитель MOV , и двигатель ENG . Модель судна, использующего внешний источник энергии, задается в виде следующего множества:

$$S = (H; MP; MO; MOV; ENG), \quad (2)$$

а весь возможный набор свойств с параметрами p_{ij} такого обобщенного судна — в виде матрицы:

$$|A_{ij}| = \begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ - & - & - \\ p_{101} & p_{102} & p_{103} \end{vmatrix}. \quad (3)$$

При проектировании нового судна по рекомендуемой методологии проектировщик на начальной стадии осуществляет синтез интегрированной системы путем выбора необходимых элементов матрицы $|A_{ij}|$. Такой целенаправленный процесс проектирования судна можно представить графами вариантов (табл. 4). Полученная цепочка будет представлять собой совокупность свойств синтезированной модели нового судна. При сопоставлении элементов матрицы $|A_{ij}|$, приведенных в табл. 4 для судов, построенных после 2000 г., и судов, построенных в 2019 г., отмечается их заметное различие в матрице (см. табл. 4) — нижний уровень значений критериев смещен в сторону их увеличения. Кроме того, некоторые признаки утрачивают свое определяющее значение (это касается совокупности элементов 7-й, 8-й и 10-й строк матрицы).

Таблица 4

Морфологические данные при синтезе свойств и параметров нового судна

Номер строки	Признаки	Альтернативные варианты (номер столбца j)			Обозначение альтернативных вариантов (элемент матрицы, P_{ij})		
		1	2	3	1	2	3
1	Материал корпуса судна	$0,7 \geq C_6 > 0,5$	$0,9 \geq C_6 > 0,7$	$C_6 > 0,9$	p_{11}	p_{12}	p_{13}
2	Форма корпуса судна	$0,9 \geq \eta_{DW} > 0,7$	$0,95 \geq \eta_{DW} > 0,9$	$\eta_{DW} > 0,95$	p_{21}	p_{22}	p_{23}
3	Коэффициент утилизации водоизмещения по дедвейту судна	$0,9 \geq \eta_{DW} > 0,7$	$0,95 \geq \eta_{DW} > 0,9$	$\eta_{DW} > 0,95$	p_{31}	p_{32}	p_{33}
4	Коэффициент утилизации водоизмещения по чистой грузоподъемности судна	$0,7 \geq \eta_p > 0,6$	$0,8 \geq \eta_p > 0,7$	$\eta_p > 0,8$	p_{41}	p_{42}	p_{43}
5	Относительная скорость судна	$0,25 \geq Fr > 0,20$	$0,30 \geq Fr > 0,25$	$Fr > 0,30$	p_{51}	p_{52}	p_{53}
6	Удельные затраты мощности	$0,4 > n \geq 0,2$	$0,2 > n \geq 0,1$	$n < 0,2$	p_{61}	p_{62}	p_{63}
7	Источник энергии	Внутренний	Комбинированный	Внешний	p_{71}	p_{72}	p_{73}
8	Степень автоматизации судна	AUT2	AUT1	OMBO	p_{81}	p_{82}	p_{83}
9	Степень универсализации судна	Универсальное	Комбинированное	Специализированное с ледовым классом	p_{91}	p_{92}	p_{93}
10	Тип движителя	Винт	Винт и специальный движитель	Специальный движитель	p_{101}	p_{102}	p_{103}

Наличие указанных различий в матрицах для судов разных сроков постройки следует учитывать при определении коэффициента $K_{\text{кп}}$. Суда, построенные в 2019 г., имеют другие значения коэффициента:

$$K_{\text{кп}}^{\wedge} = K_{\text{кп}} - 0,33. \quad (4)$$

Возможность развития флота при оптимизации энергетических ресурсов (например, кратного отбора мощности на ВРК) не может рассматриваться как безальтернативная. Переход от эволюционного пути развития к революционному может происходить и по другим направлениям, в частности в области новых технологий перевозок грузов, обеспечивающих сверхвысокую интенсивность выполнения транспортных операций, создание судов с высокой степенью автоматизации (автономных и полуавтономных судов) и энергоэффективности. Для таких судов определен модульный принцип проектирования с оптимизацией параметров каждого независимого модуля системы. По нашему мнению, оптимальное проектирование сложной технической системы по данному принципу при недооценке рисков способно уже на стадии проектирования содержать «скрытые угрозы» неустойчивого равновесия, определяя уязвимость элементов системы по типу слабого звена и перевода системы в «неуправляемые состояния». Задача оптимального проектирования в данном случае не решается формально и ее следует формулировать следующим образом:

$$K_{\text{кп.Ау}}(C)(C)_{a,b} \rightarrow \min, \quad (5)$$

т. е., согласно приведенному условию, необходимо выбрать параметры a и b , обеспечивающие минимум функционала $K_{\text{кп.Ау}}(C)$ уникальными качествами, присущими новому судну в его синтезированной матрице качеств $|C|$ на фазовом пространстве $|A_y|$. В большинстве случаев оптимизация состоит в выборе параметров a и b , обеспечивающих наибольшее значение $K_{\text{кп}}$. Оценка большинства моделей качеств по условию (5), присущих современным судам, задает экстремаль, определенную графами вариантов, с параметрами a и b , значительно снижающими нормативные сроки эксплуатации судна до 10–12 лет, что объясняется повышенной аварийностью к середине нормативных сроков эксплуатации. Поэтому, исходя из предложенного ранее алгоритма, для судов нового поколения следует с целью уменьшения рисков серьезных аварийных случаев ограничить нормативные сроки службы для эксплуатации судна без существенной модернизации (конверсии).

Вводя в задачу проектирования дополнительные ограничения по рискам, для обеспечения устойчивой безопасной работы рассматриваемая математическая модель судна переводится в ряд систем с «неэкономической ответственностью», т. е. убытки от аварии могут во много раз превышать стоимость судна и груза. При этом следует понимать, что морское судно представляет собой объект повышенной опасности, где самой малой вероятности неблагоприятного исхода будет соответствовать самый большой риск (например, риск потери конструктивной безопасности при переломе корпуса судна), который необходимо учитывать на стадии проектирования. Просчитать, предупредить и ликвидировать последствия рисков на море в условиях заведомо неполной информации о способности судна и его элементов сохранять устойчивость к отказу, заложенной на стадии проектирования, невозможно. При проектировании судна предпочтительнее использовать понятие «мера риска». Математическая запись будет более понятна, если обозначить риск $R(t_i)$, а вероятность предсказанного события — $P(N_i)$. Существует определенная «остаточная способность» системы $N = f(\lambda, \beta, \gamma)$, зависящая от характеристики ее критических параметров качества: λ , β и γ . Следовательно, для того, чтобы определить «уровень» способности N конструкции противостоять внешним воздействиям, достаточно знать, в какой точке пространства параметров λ , β и γ в данный момент времени находится рассматриваемая техническая система (или подсистема):

$$R(t_i) = 1 - p(N_i). \quad (6)$$

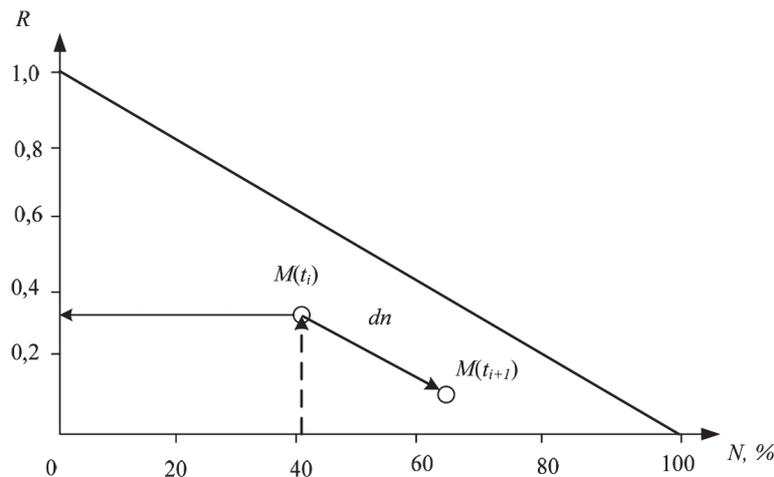
Используя равенство (6) к оценке каждого признака из табл. 4 с позиции рисков, следует определить $p(N_i)$ как вероятность отказа по каждому признаку (фактически устойчивость системы к отказу — уязвимость системы). При этом формализованная оценка безопасности проектируемого судна должна определяться в виде

$$\sum_i^n R_i = \sum_i^n (1 - (N_i)). \quad (7)$$

Выводы (Conclusions)

1. Используя предложенную методику, можно назначая вероятности отказов по каждому существенному признаку элемента проектируемого судна, достаточно объективно оценить уровень безопасности по разрабатываемому проекту.

2. Для решения практических задач, используя графическое изображение аналитической зависимости (7), приведенное на рисунке, можно определить расчетную точку $M(t_i)$, характеризующую с заданной степенью риска остаточную способность (уязвимость проектируемого объекта), и одновременно выбрать направление dn вывода системы из опасного состояния. К этому сводятся выбор и назначение ограничений при проектировании. По мере развития технологии морских перевозок и судостроения могут измениться только методы перевода системы из одного состояния в другое, но цель остается неизменной — составить функционал и определить оптимальную управляющую функцию, снижающую уязвимость и повышающую безопасность эксплуатации судна как системы с неэкономической ответственностью.



Гипотетическая зависимость, построенная в координатах *риск – остаточный ресурс*

3. Представленные в работе результаты исследований могут быть полезны для судоходных компаний организаций судостроительной промышленности в целях уточнения технических заданий и оптимизации процессов, связанных с проектированием и заказом коммерческого флота морских судов различных классов и типов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аристархов В. Срок действия Федеральной программы следует продлить / В. Аристархов // Морской флот. — 2001. — № 1. — С. 8.
2. Москаленко М. А. Состояние и перспективы обновления Российского флота / М. А. Москаленко, В. Ф. Рычкова, Д. Ф. Рычков // Морские интеллектуальные технологии. — 2016. — № 3-1 (33). — С. 290–296.
3. Захаров И. Оценка потребности России в новых судах / И. Захаров, Г. Егоров // Морской флот. — 2009. — № 2. — С. 42–49.

4. Ключев В. В. Анализ проблем безопасности мореплавания на российских судах в Азиатско-Тихоокеанском регионе / В. В. Ключев // Проблемы транспорта Дальнего Востока: пленарные доклады пятой международной научно-практической конференции. — Владивосток, 2003. — С. 32–38.
5. Кацман Ф. М. Аварийность морского флота и проблемы безопасности судоходства / Ф. М. Кацман, А. А. Ершов // Транспорт Российской Федерации. — 2006. — № 5 (5). — С. 82–84.
6. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 года (текст, измененный протоколом 1988 года к ней, с поправками). — СПб.: ЦНИИМФ, 2008. — 984 с.
7. Сазонов К. Е. О ледовой ходкости и управляемости крупнотоннажных судов двойного действия в Арктике / К. Е. Сазонов // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2016. — № 1 (107). — С. 50–60.
8. Компанец В. А. Анализ гражданского флота, подконтрольного РМРС / В. А. Компанец // Морские интеллектуальные технологии. — 2019. — № 3-1 (45). — С. 48–51.
9. Москаленко М. А. Оценка эффективности модернизации корпуса морских судов малой тоннажной группы / М. А. Москаленко, З. М. Субботин, Л. В. Захарина // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 88–94.
10. Москаленко М. А. Основы обеспечения конструктивной безопасности морских судов / М. А. Москаленко. — Владивосток: Дальнаука, 2005. — 162 с.

REFERENCES

1. Aristarkhov, V. “Srok deistviya Federal’noi programmy sleduet prodlit’.” *Morskoi flot* 1 (2001): 8.
2. Moskalenko, M. A., V. F. Rychkova, and D. F. Rychkov. “Sostoyanie i perspektivy obnovleniya Rossiiskogo flota.” *Marine Intelligent Technologies* 3-1(33) (2016): 290–296.
3. Zakharov, I., and G. Egorov. “Otsenka potrebnosti Rossii v novykh sudakh.” *Morskoi flot* 2 (2009): 42–49.
4. Klyuev, V.V. “Analiz problem bezopasnosti moreplavaniya na rossiiskikh sudakh v Aziatsko-Tikhookeanskom regione.” *Problemy transporta Dal’nego Vostoka: Plenarnye doklady pyatoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Vladivostok, 2003. 32–38.
5. Katsman, F. M., and A. A. Ershov. “Avariinost’ morskogo flota i problemy bezopasnosti sudokhodstva.” *Transport Rossiiskoi Federatsii* 5(5) (2006): 82–84.
6. *The International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS Convention)*. SPb.: TsNIIMF, 2008.
7. Sazonov, K. E. “O ledovoi khodkosti i upravlyaemosti krupnotonnazhnykh sudov dvoynogo deistviya v Arktike.” *Problemy Arktiki i Antarktiki* 1(107) (2016): 50–60.
8. Kompanets, Vasily A. “Analysis of civil fleet, affiliated to the RMRS.” *Marine Intelligent Technologies* 3-1(45) (2019): 48–51.
9. Moskalenko, M. A., Z. M. Subbotin., and L. V. Zakharina. “Assessment of the effective feasibility modernization of hull marine vessels of small tonnage.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(28) (2014): 88–94.
10. Moskalenko, M. A. *Osnovy obespecheniya konstruktivnoi bezopasnosti morskikh sudov*. Vladivostok: Dal’nauka, 2005.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Москаленко Михаил Анатольевич —
 доктор технических наук, профессор
 Морской государственной университет
 им. адм. Г. И. Невельского
 690003, Российская Федерация, Владивосток,
 ул. Верхнепортовая, 50а
 e-mail: asmsh@rambler.ru
Друзь Иван Борисович —
 доктор технических наук, профессор
 Морской государственной университет
 им. адм. Г. И. Невельского
 690003, Российская Федерация, Владивосток,
 ул. Верхнепортовая, 50а
 e-mail: druz_i_b@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Moskalenko, Mikhail A. —
 Dr. of Technical Sciences, professor
 MSU named after
 adm. G. I. Nevelskoy
 50a Verhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
 Russian Federation
 e-mail: asmsh@rambler.ru
Druz, Ivan B. —
 Dr. of Technical Sciences, professor
 MSU named after
 adm. G. I. Nevelskoy
 50a Verhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
 Russian Federation
 e-mail: druz_i_b@mail.ru

Москаленко Владислав Михайлович —
аспирант

Научный руководитель:

Луговец Александр Анатольевич —
доктор экономических наук, профессор
Морской государственной университет
им. адм. Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: vlad2420@mail.ru

Moskalenko, Vladislav M. —
Postgraduate

Supervisor:

Lugovets, Alexander A. —
Dr. of Economic Sciences, professor
MSU named after
adm. G.I. Nevelskoy
50a Verhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: vlad2420@mail.ru

Статья поступила в редакцию 14 сентября 2020 г.

Received: September 14, 2020.

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-915-925

DEVELOPMENT OF THE VESSEL STRENGTHENING SCHEMES FOR GROUND CONTACT

A. P. German, V. A. Kulesh, Pham Trung Hiep

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

Exploiting and developing the coast of the Russian Arctic and Far Eastern seas are important. Traditionally, it is associated with the use of vessels for grounding and carrying out cargo operations. However, the requirements for such vessels were introduced in the Register Rules only in 2017. Previously, these operations could be interpreted as accidents. The Sea of Okhotsk is one of the largest seas in Russia, but there is only one large port on its coast - Magadan. The northern part of the Far Eastern coast is characterized by tides with sea level differences of up to 10 m and more. Heavy ice conditions also play a significant role. In these conditions, expensive berths and port infrastructure development are not economically justified and so traditional schemes of cargo operations are still important. However, there are not enough special vessels. The issues of the longitudinal, transverse and local strength of the hull of a small Japanese-built vessel with deadweight of 420 tons are considered in the paper. The vessel is oriented to work off the western coast of Kamchatka. It is capable to deliver both general cargo and liquid fuel. It has been shown that the longitudinal strength of the hull, the transverse strength of the vessel holds and the strength of the vessel stem satisfy the NAABSAI class symbol. The ship plating and bottom longitudinal girders in the areas, where the floors are located via three and four spaces, as well as the sternframe sole require strengthening. Strengthening schemes, whose realization ensures the possibility of obtaining the NAABSAI class symbol and cargo operations of the vessel aground are considered and proposed.

Keywords: vessel grounding, requirements, strengthening.

For citation:

German, Andrey P., Victor A. Kulesh, and Pham Trung Hiep. "Development of the vessel strengthening schemes for ground contact." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 12.5 (2020): 915–925. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-915-925.

УДК 629.12

РАЗРАБОТКА СХЕМ УСИЛЕНИЯ СУДНА ДЛЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ГРУНТОМ

А. П. Герман, В. А. Кулеш, Фам Чунг Хиеп

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация

В работе рассмотрен важный этап освоения и развития побережья арктических и дальневосточных морей России, связанный с использованием судов для посадки на грунт и проведением грузовых операций. Отмечается, что новые требования к таким судам появились в Правилах Российского морского регистра судоходства только в 2017 году. Ранее подобные операции могли трактоваться как аварийные происшествия. Подчеркивается, что несмотря на то, что Охотское море является одним из крупнейших в России, оно имеет лишь один сравнительно крупный порт — Магадан. Северная часть дальневосточного побережья характеризуется приливами с перепадами уровня моря до 10 м и более. Акцентируется внимание на том, что существенную роль в процессе освоения и развития территории играет и тяжелая ледовая обстановка. В этих условиях дорогостоящие причалы и развитие портовой инфраструктуры экономически не оправданы, поэтому важно продолжать использовать традиционные схемы грузовых операций с осушением судов, но специальных судов для этого не хватает. В работе рассмотрены вопросы общей продольной, поперечной и местной прочности корпуса небольшого судна японской постройки с дедвейтом 420 т, которое ориентировано на работу у западного побережья Камчатки с заходами в устья рек и способно доставлять как генеральные грузы, так и жидкое топливо. Показано, что общая продольная прочность корпуса, поперечная прочность отсеков и прочность форштевня судна соответствуют символу класса NAABSAI. Наружная обшивка и продольные днищевые балки в районах, где флоры расположены через три-четыре ипации, а также ятка ахтерштевня, требуют усиления. Рассмотрены и предложены схемы усиления, реализация которых

обеспечивает возможность получения символа класса NAABSA1 и эксплуатацию судна с посадками на грунт для проведения погрузочно-разгрузочных операций.

Ключевые слова: посадка на грунт, требования, усиления.

Для цитирования:

Герман А. П. Разработка схем усиления судна для взаимодействия с грунтом / А. П. Герман, В. А. Кулеш, Фам Чунг Хиеп // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 5. — С. 915–925. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-915-925.

Введение (Introduction)

Охотское море — одно из крупнейших в России — обладает огромными ресурсами и имеет важное стратегическое значение. При этом на его побережье очень низкая плотность населения, а к сравнительно крупным портам относится только Магадан. Сложная ледовая обстановка сочетается с большими перепадами уровня моря, которые в северной части могут превышать 10 м. В этих условиях строительство причалов и портов экономически не оправдано. Вопросы жизнедеятельности на побережье традиционно решаются за счет посадки судов на необорудованный берег для проведения грузовых работ [1]. Такие режимы, представляющие угрозу для поврежденных судов, до недавнего времени относились к аварийным происшествиям, требующим внеочередных доковых освидетельствований.

Исследования процессов взаимодействия судов с грунтом проводятся как отечественными [2]–[4], так и зарубежными учеными. Воздействие грунта на корпус требует учета пластических деформаций днищевых связей [5] и проектных требований к ним [6]. Основное внимание в работах [7]–[9] уделяется режиму десантирования или аварийным происшествиям, когда судно имеет поступательную скорость к началу контакта. Многие суда взаимодействуют с грунтом без динамики в результате полного или частичного осушения из-за перепадов уровня воды [10]. Такие режимы характерны для устьев многих рек. В правилах иностранных классификационных обществ, особенно европейских, таких как французская компания Bureau Veritas и норвежская Det Norske Veritas, появились первые нормативные требования к этим судам. Несколько позднее Российский морской регистр судоходства (РМРС) выпустил циркулярное письмо¹ в отношении таких судов, а с 2017 г. в Правилах РМРС² появилась новая глава в отношении судов с возможностью присвоения символа класса NAABSA для посадки на грунт.

Проектирование и постройка таких судов являются долговременной процедурой. Поэтому интерес представляет возможность приведения судов в процессе эксплуатации к соответствию указанному символу класса. Как правило, это связано с дополнительными затратами для судовладельцев, в том числе на усиления судна. Опыт подобных работ пока ограничен, из имеющихся публикаций следует отметить работу [11].

В предлагаемом исследовании рассмотрены вопросы прочности и ее повышения в отношении небольшого судна «Вектор» японской постройки дедвейтом 420 т, которое имеет собственное грузовое устройство и способно перевозить не только генеральные грузы, но и жидкое топливо. Судно ориентировано на грузовые операции в реках западной части Камчатки. В таких условиях характерна посадка на грунт и полное осушение корпуса.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Сведения о судне и корпусе. Судно «Вектор» водоизмещением 716 т с размерами $L \times B \times H \times T = 40 \times 8 \times 3,5 \times 3,1$ м предназначено для перевозки грузов различной номенклатуры в единственном грузовом трюме с размерами люка $14,3 \times 5,5$ м. В нос и корму от трюма выделены грузовые танки длиной до 5 м. Судно обеспечено грузовой стрелой на 3 т с вылетом до 17 м (рис. 1).

¹ Циркулярное письмо РМРС. № 340-21-810ц от 07.04.2015.

² Правила классификации и постройки морских судов. Ч. XVII. Разд. 15. Требования к судам, эксплуатация которых предусматривает посадку на грунт (суда NAABSA). — СПб.: РМРС, 2020.



Рис. 1. Общий вид судна «Вектор»

Корпус судна имеет килеватость днища, одну палубу, двойное дно высотой до 0,8 м и двойные борта шириной до 1,25 м. Корпус разбит поперечными переборками на семь отсеков. Грузовые танки имеют продольные переборки в диаметральной плоскости (ДП). Грузовая часть корпуса набрана по смешанной системе: двойное дно — продольная, другие перекрытия — по поперечной. Шпации обеих систем составляют 550 мм независимо от района корпуса. Флоры и рамные шпангоуты установлены с интервалом не более 3–4 шпации.

В районе грузовой зоны обшивка днища толщиной 8–11 мм поддерживается продольными балками из уголка $100 \times 75 \times 7$ и полос 100×9 . Рамный днищевой набор имеет толщину стенок 8 мм. Продольные балки днища с пролетом более двух шпаций в районе двойного дна связаны с продольными балками второго дна стойками из уголков $75 \times 75 \times 9$. Поперечные сечения корпуса показаны на рис. 2. Видно, что в районе грузовых танков второе дно и внутренний борт отсутствуют.

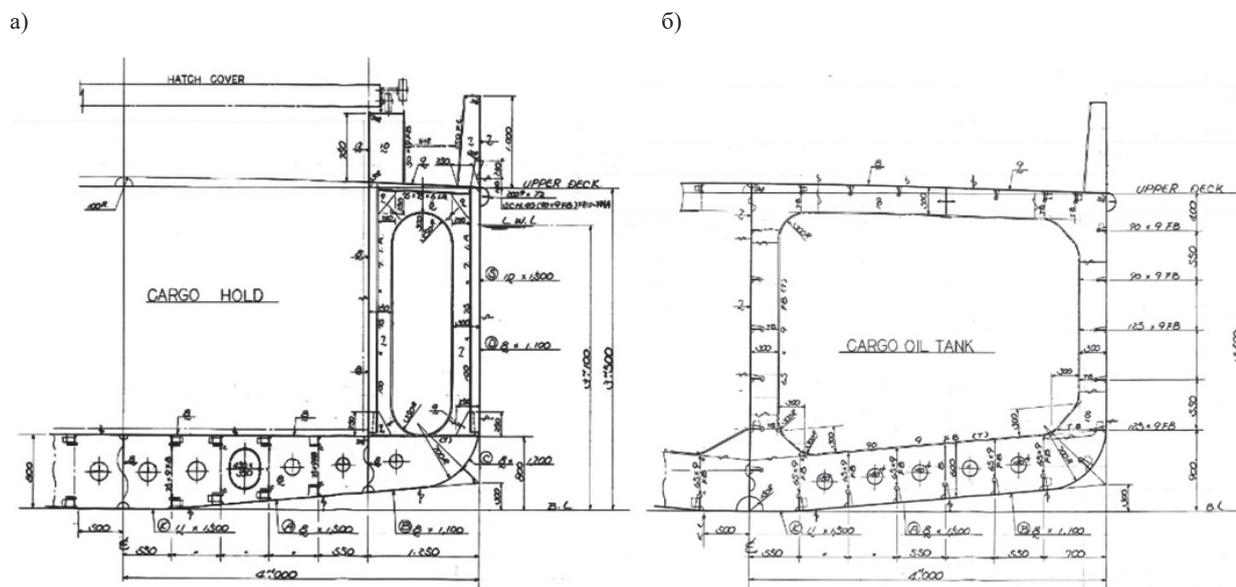


Рис. 2. Схемы характерных сечений корпуса по трюму (а) и грузовому танку (б)

Пятка ахтерштевня коробчатого сечения с размерами 230×190 мм с толщиной элементов 20 мм в основании усилена переходной кницей $450 \times 410 \times 20$. Форштевень имеет тавровое сечение $8 \times 200/60 \times 9$.

Расчетные нагрузки. Интенсивность давления на элементы конструкций, непосредственно взаимодействующие с грунтом:

$$p_i = 10d_N(1 + 4/\sqrt{A_i})k_p, \quad (1)$$

где d_N — глубина погружения судна в районе миделя при расчетном водоизмещении; A_i — площадь деформированного участка элемента; k_p — коэффициент запаса.

Интенсивность давления для участков обшивки корпуса, днищевых балок и стенок рамного набора указаны в таблице.

Интенсивность давления для связей днища

Местоположение	Размеры зоны, м		Давление p , кПа
	Вдоль	Поперек	
Обшивка днища			
Район скулы	0,550	0,650	238
Флоры через две шпации	1,100	0,550	190
Флоры через три шпации	1,650	0,550	161
Флоры через четыре шпации	2,200	0,550	144
Продольные днищевые балки			
Флоры через две шпации	1,100	1,100	144
Флоры через три шпации	1,650	1,100	123
Флоры через четыре шпации	2,200	1,100	111
Рамный днищевой набор (стенки)			
Вертикальный киль	0,550	2,750	198
Стрингеры	0,550	0,550	385
Флоры через четыре шпации	2,200	0,550	216
Бракета киля	0,550	0,825	323
Бракета скуловая	0,550	0,650	358

Концевые реакции взаимодействия корпуса и грунта определяются по формуле

$$R_N^m = g\Delta_N \left[\frac{\operatorname{tg}(\psi_N - \psi_0 - \psi_S) L}{6 d_N} \right], \quad (2)$$

где Δ_N — водоизмещение судна (расчетное); ψ_N — угол наклона грунта в продольном направлении судна; ψ_0 — конструктивный дифферент (угол); ψ_S — эксплуатационный дифферент (угол).

Для судов класса NAABSA1 значения концевых реакций не должны быть менее

$$R_N^m = 3g\Delta_N / 12 = 1756 \text{ кН}. \quad (3)$$

Интенсивность нагрузки со стороны грунта при проверке прочности (поперечной) отсека

$$Q_{0S} = k_p R_N^n \frac{L_{0S}}{L_{BN}} = 3805 \text{ кН}, \quad (4)$$

где $k_p = 1,5$ — коэффициент запаса; $R_N^n = g\Delta_N = 7024 \text{ кН}$; $L_{0S} = 14,3 \text{ м}$ — длина отсека / трюма судна; $L_{BN} = 39,6 \text{ м}$ — расчетная длина по днищу.

Актуальное значение изгибающего момента (прогиб на тихой воде)

$$M_{SW} = -k_M g\Delta_N L = -2810 \text{ кН}\cdot\text{м}. \quad (5)$$

Изгибающий момент от носовой концевой реакции грунта (для корпуса судна)

$$M_N = -0,363\Delta_N L = -10396 \text{ кН}\cdot\text{м}. \quad (6)$$

Полученные значения позволяют оценить запасы общей продольной прочности.

Результаты (Results)

Общая продольная прочность. Предельный момент сопротивления корпуса проверялся в условиях совместного действия двух изгибающих моментов: от носовой концевой реакции, определенной по формуле (6), и на тихой воде, рассчитанной по формуле (5). В конце срока службы допускаемый остаточный предельный момент сопротивления поперечного сечения корпуса должен превышать следующее рассчитанное значение:

$$W_{\text{п(дн)}} = 1,1 \frac{|0,92M_N + M_{SW}|}{R_{eH}} 10^3 = 57922 \text{ см}^3, \quad (7)$$

где R_{eH} — предел текучести (верхний) МПа.

Расчетный остаточный предельный момент сопротивления корпуса определен согласно схеме эквивалентного бруса (рис. 3), где красным цветом отмечены «гибкие» связи, исключаемые из состава эквивалентного бруса в случае их склонности к потере устойчивости при сжатии. Также из состава эквивалентного бруса исключаются связи, подверженные деформированию (выделены синим цветом). Черным цветом выделены «жесткие» связи.

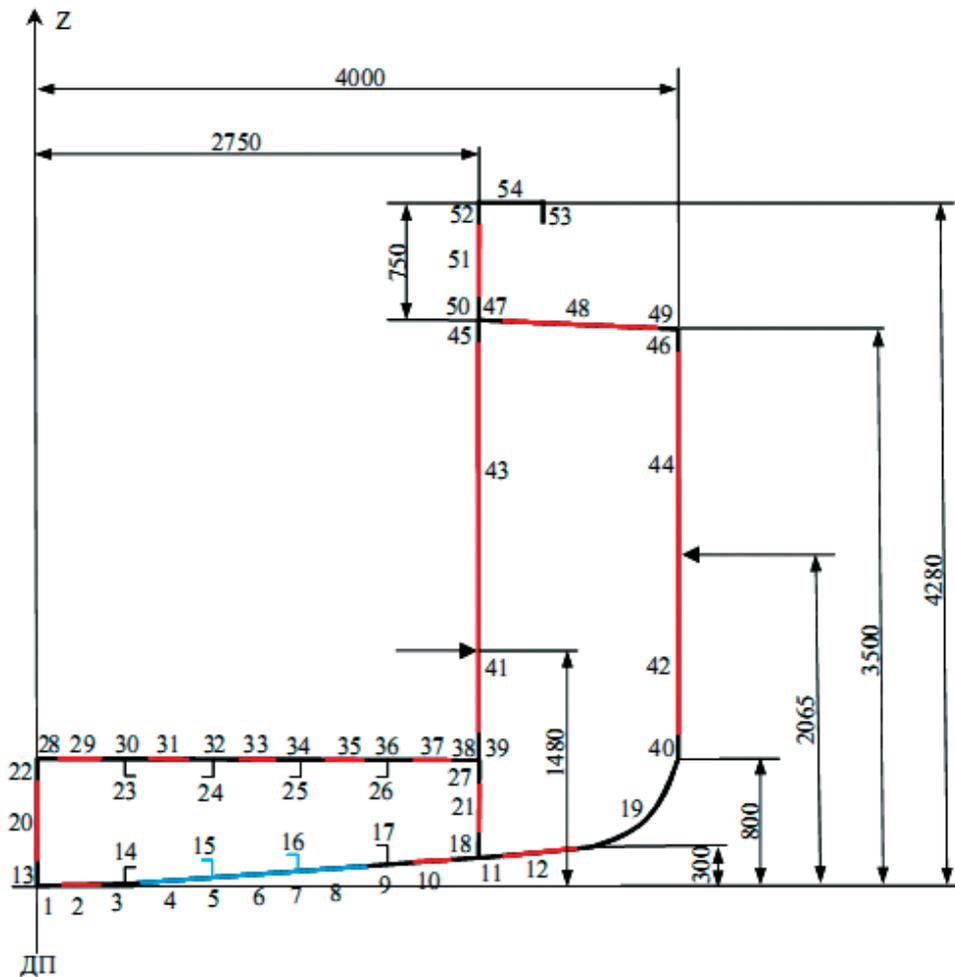


Рис. 3. Схема эквивалентного бруса

Расчеты выполнены для двух состояний корпуса: нового и при износе всех связей на 30 %. Учет износа и исключение конструктивных связей привели к снижению площади поперечного сечения эквивалентного бруса до 45 % от построечного значения. По результатам выполненных расчетов определены предельные остаточные моменты сопротивления корпуса, превышающие допускаемые Правилами РМРС:

– для палубы W_n , см²·м,

$$W_n = \frac{J}{H_m - e} = 701 > 579; \quad (8)$$

– для днища $W_{дн}$, см²·м,

$$W_{дн} = \frac{J}{e} = 5350 \gg 579. \quad (9)$$

Таким образом, общая предельная прочность корпуса судна в конце срока эксплуатации обеспечивается с запасом 21 %.

Поперечная прочность отсека. При проверке прочности рамного набора днищевого перекрытия само перекрытие представляется в виде стержневой системы. Как правило, прочность днищевого перекрытия в грузовой части трюма — наименьшая. Интенсивность нагрузки при этом определяется по формуле (4), а приведенные напряжения не превышают допустимые: 160 МПа — для флоров, 138 МПа — для стрингеров и киля.

Для расчета прочности грузового отсека применялся метод конечных элементов (МКЭ) при условии приложения нагрузки от грунта к продольным балкам. На рис. 4 показана расчетная модель половины грузового отсека и эпюры приведенных напряжений для существующей конструкции и при наибольшем весе судна.

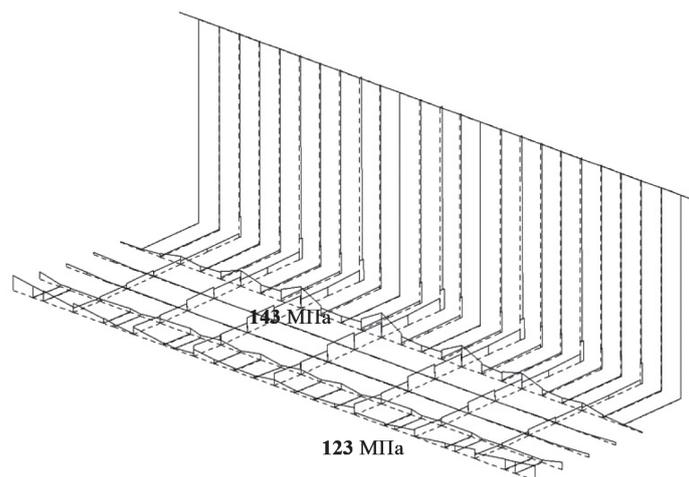


Рис. 4. Конструктивная схема отсека и расчетные напряжения

Выявлено, что уровень напряжений в вертикальном киле и в стрингерах меньше допустимого. Наибольшие напряжения в вертикальном киле у переборок — 123 МПа, а во флорах в середине перекрытия — 143 МПа. Результаты представлены для случая достаточно прочного грунта, когда давление концентрируется в районе киля. В случае податливых грунтов давления распределяются с большей шириной зоны контакта, а напряжения снижаются. Результаты расчетов показали, что поперечная прочность корпуса обеспечена и не требует подкреплений.

Местная прочность. Толщины панелей стенок рамного днищевого набора были проверены на условия смятия кромок по формуле

$$s_{л0} = s_1 \cong \frac{0,80k_1pb}{R_{eH}}, \quad (10)$$

где b — расстояние между кромками листовых связей (интервал размещения), м;

$k_1 = 1,3$ — для судов неарктического плавания;

p — давление (значения приведены в таблице (с. 918));

В итоге построечные толщины примерно в 1,7–2,4 раза превышают рассчитанные по формуле (10).

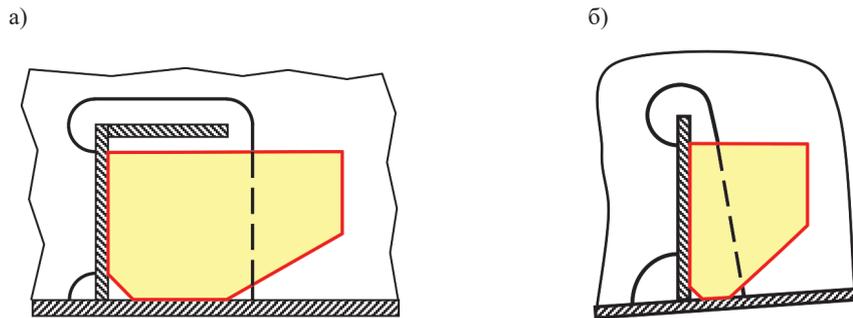


Рис. 5. Схемы рекомендованных заделок вырезов во флорах:
 а — для балок уголкового профиля; б — для балок полосового профиля

Как правило, для прохода днищевых балок панели флоров имеют вырезы, которые снижают прочность. Некоторые вырезы не обеспечиваются компенсационными заделками. Для таких вырезов рекомендованы схемы подкреплений (рис. 5) с толщиной заделок 9 мм.

Пластины обшивки днища отличаются по размерам от пластин скулы и имеют разные системы набора. Соответственно требования к их толщинам должны определяться по-разному. Требуемая толщина наружной обшивки, согласно Правилам РМРС, определяется по формуле

$$s = 15,8ak_{\alpha}\sqrt{\frac{k_p p}{k_{\sigma} R_{eH}}}m_n^{-1}, \quad (11)$$

где a и b — соответственно меньшая и большая стороны пластины;

$k_{\alpha} = (1 - \alpha + \pi\alpha / 6) / (1 - \alpha + \pi\alpha / 2)$ — коэффициент соотношения сторон $\alpha = a / b$;

$k_p = 1,5$ — запас прочности (при отсутствии внешней защиты);

p — давление (данные приведены в таблице (с. 918));

k_{σ} — коэффициент допускаемых напряжений;

$m_n = 0,75$ (n — коэффициент допускаемой остаточной толщины (при отсутствии внешней защиты)).

Для пяти типов пластин обшивки днища выполнены расчеты по формуле (11), которые показали следующие значения коэффициентов запаса толщины:

1,39 — горизонтальный киль;

1,23 — обшивка скулы;

1,00 — обшивка днища (флоры через две шпации);

0,91 — обшивка днища (флоры через три шпации);

0,89 — обшивка днища (флоры через четыре шпации).

Вывод: требуется подкрепление в районах с флорами, установленными через три-четыре шпации (см. коэффициенты, выделенные полужирным шрифтом).

В районе двойного дна и продольной системы набора днищевые балки разных пролетов — до четырех шпаций. Продольные балки одинарного дна в танках имеют пролеты не более трех шпаций. В результате расчетов этих балок получены следующие коэффициенты запасов (по моменту сопротивления и по площади сечения стенки):

1,37 и 1,25 — уголок $100 \times 75 \times 7$ — пролет двух шпаций;

0,82 и 1,69 — полосовой профиль 150×9 — пролет трех шпаций;

1,03 и 1,35 — уголок $100 \times 75 \times 7$ — пролет трех шпаций;

0,63 и 1,08 — уголок $100 \times 75 \times 7$ — пролет четырех шпаций.

Расчеты показали, что при пролетах днищевых продольных балок в три-четыре шпации имеются отступления и требуются подкрепления. В качестве усилений рассмотрен вариант установки дополнительных поперечных балок. Вариант установки дополнительных продольных балок показал, что в этом случае вес усилений, габаритные размеры деталей и трудоемкость работ повышаются, особенно внутри двойного дна.

Рассмотрены следующие варианты усиления поперечными балками:

1. Одинарное дно в грузовых танках (полосы 150×10).
2. Двойное дно, где флоры через три шпации (полосы 85×9).
3. Двойное дно, где флоры через четыре шпации (уголок $100 \times 75 \times 10$).

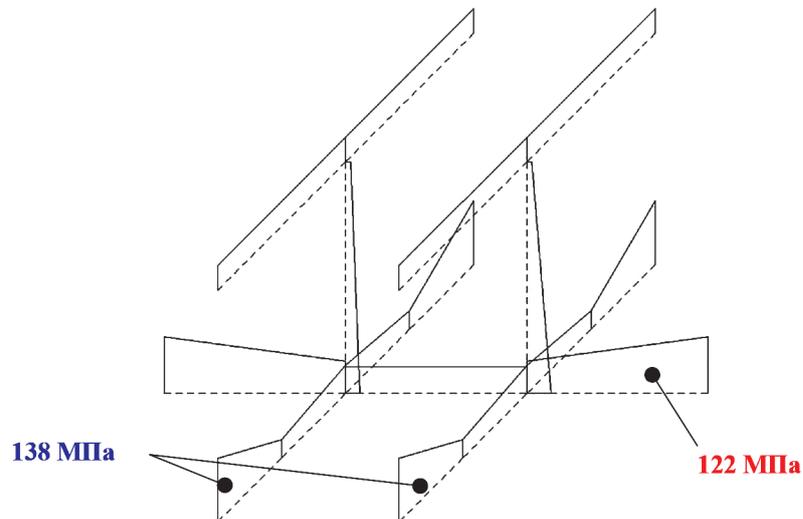


Рис. 6. Схема балочной конструкции между флорами и напряжения: 138 МПа — продольные днищевые балки; 122 МПа — поперечная усиливающая балка

Результаты расчетов показали, что наибольшие напряжения при указанных усилениях меньше установленных Правилами РМРС (рис. 6).

Прочность ахтерштевня. Согласно требованиям Правил РМРС, все размеры поперечных сечений ахтерштевня проверяются на основании прямого расчета прочности. Допустимые напряжения 160 МПа. На рис. 7 приведена конструкция ахтерштевня. Проверка прочности пятки ахтерштевня при посадке на грунт показала, что конструкции требуются усиления, т. к. наибольшие напряжения в ее основании составляют 280 МПа, что значительно превышает допустимое значение 160 МПа.

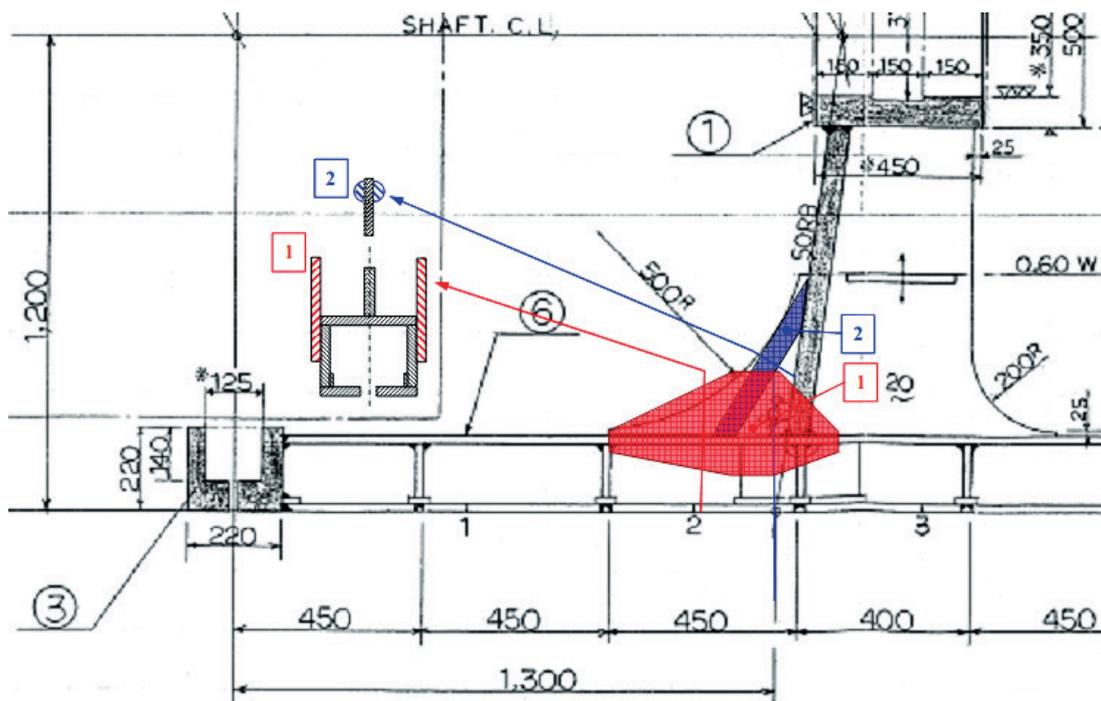


Рис. 7. Конструкция ахтерштевня и схема усиления

Для усиления конструкции пятки ахтерштевня устанавливают вертикальные бракетки / размерами $20 \times 250 \times 550$ мм, которые приваривают к вертикальным стенкам пятки ахтерштевня. Также устанавливают и полосы 2 полукруглого сечения радиусом 25 мм, которые приваривают к существующей бракете под углом 60° к горизонту. Принципиальная схема усиления пятки ахтерштевня показана на рис. 7. После усиления пятки ахтерштевня проверка прочности показала, что ее жесткость увеличилась в 1,3 раза, а наибольшие напряжения уменьшились в 1,9 раза (до 147 МПа) и не превышают допустимого значения.

Прочность форштевня. Достаточность размеров поперечных сечений форштевня, аналогично размерам ахтерштевня, проверяется на основании расчета криволинейной балки переменного сечения. Опорами этой балки являются палубы, платформы и поперечные переборки. МКЭ — модель конструкции форштевня в районе форпика, а также эпюры погонной нагрузки от грунта и приведенных напряжений приведены на рис. 8.

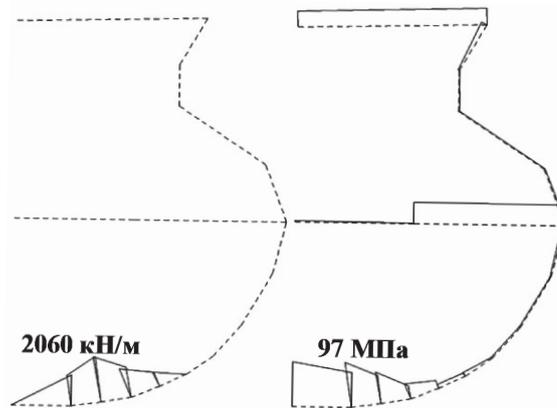


Рис. 8. Эпюра нагрузки в основании форштевня и напряжения

Наибольшие напряжения в опорном сечении у форпиковой переборки составляют 97 МПа, что меньше допускаемых 160 МПа. В итоге прочность форштевня достаточна и не требует усиления.

Усиления корпуса и пятки ахтерштевня. Рекомендованные усиления были реализованы весной 2020 г. во время ремонта судна в Южной Корее. На рис. 9 приведены фотографии фрагментов подкреплений корпуса поперечными балками по днищу, а также пятки ахтерштевня в ее основании. (Фотографии сделаны в Южной Корее сотрудниками компании International Maritime Bureau Co., Ltd по запросу авторов данной публикации и для подтверждения факта усиления судна). Реализация усиления позволила владельцу ходатайствовать в РМРС о присвоении судну символа класса NAABSA1.

а)



б)



Рис. 9. Фрагменты усиления днища (а) и пятки (б) ахтерштевня судна

Символ NAABSA (Not Always Afloat But Safely Aground — не всегда на плаву, но безопасно на грунте) предусматривает частичное или полное осушение подводной части корпуса в местах,

приспособленных к посадке судов на грунт в виде ровных однородных песчано-галечных или песчано-илистых пляжей при отсутствии поступательного движения судна и в закрытых от волнения акваториях, к которым относят также и устья камчатских рек.

Заключение (Conclusion)

В данной работе приведены расчетные обоснования усиления корпуса судна для условий соответствия символу класса RMPC NAABSA1. Показано, что требуется усиление обшивки и балок днища в районе с продольной системой набора, где флоры расположены с интервалами 3–4 шпации, а также основания пятки ахтерштевня. Предложены возможные схемы усилений, реализованные в процессе ремонта 2020 г., которые позволяют ходатайствовать в RMPC о присвоении указанного символа класса. Исследование подобного рода является одним из первых в истории российского флота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулеш В. А. Актуальность и безопасность грузовых операций при посадке судов на грунт / В. А. Кулеш, В. А. Петров // Морские интеллектуальные технологии. — 2015. — № 3-1 (29). — С. 75–80.
2. Мамонтов А. И. Натурный эксперимент: определение давления на корпус судна при контакте с грунтом / А. И. Мамонтов, А. М. Шмелев, А. О. Фролова // Морские интеллектуальные технологии. — 2015. — № 4-2 (30). — С. 8–17.
3. Азовцев А. И. Предложения по развитию требований к судам, эксплуатация которых предусматривает посадку на грунт / А. И. Азовцев, В. И. Евенко, В. А. Кулеш, М. А. Кутейников, А. С. Огай, В. А. Петров // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2016. — № 42-43. — С. 47–58.
4. Кулеш В. А. Нагрузки взаимодействия при ударах корпуса судна о грунт / В. А. Кулеш // Морские интеллектуальные технологии. — 2016. — № 3-1 (33). — С. 75–80.
5. Гирин С. Н. Оценка устойчивости ребер судового корпуса с потерявшей устойчивость / С. Н. Гирин, Т. А. Исаева // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2019. — № S1. — С. 38-43. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-S-I-38-43.
6. Mano M. Practical design of hull structures / M. Mano, Y. Okumoto, Y. Takeda. — Senpaku Gijutsu Kyokai, 2000. — 535 p.
7. Hansen N. E. O. Soil mechanics of ship beaching / N. E. O. Hansen, B. C. Simonsen, M. J. Sterndorff // Coastal Engineering 1994. — 1995. — Pp. 3030–3044. DOI: 10.1061/9780784400890.2.
8. Pedersen T. P. Absorbed energy in ship collision and grounding - Revising Minorsky's Empirical Method / T. P. Pedersen, S. Zhang // Journal of Ship Research. — 2000. — Vol. 44. — No. 2. — Pp. 140–154.
9. Kendrick A. Ice Interaction scenarios and load modeling approaches (BMT Report 6007A. DFR submitted to ABS) / A. Kendrick, C. Daley. — 2006. — 150 p.
10. Simonsen B. C. Mechanics of Ship Grounding. PhD. thesis, Department of Naval Architecture and Offshore Engineering. — Technical University of Denmark, 1997. — 265 p.
11. Кулеш В. А. Опыт приведения судна к условиям класса NAABSA (посадка на грунт) / В. А. Кулеш, А. И. Азовцев // Морские интеллектуальные технологии. — 2020. — № 1-2 (47). — С. 69–76. DOI: 10.37220/MIT.2020.47.1.080.

REFERENCES

1. Kulesh, V. A., and V. A. Petrov. "Aktualnost i bezopasnost gruzovykh operatsii pri posadke sudov na grunt." *Marine Intelligent Technologies* 3-1(29) (2015): 75–80.
2. Mamontov, A. I., A. M. Shmelev, and A. O. Frolova. "Naturanii eksperiment opredelenie davleniia na korpus sudna pri kontakte s gruntom." *Marine Intelligent Technologies* 4-2(30) (2015): 8–17.
3. Azovtsev, A. I., V. I. Evenko, V. A. Kulesh, M. A. Kuteinikov, A. S. Ogai, and V. A. Petrov. "Predlozheniia po razvitiu trebovaniu k sudam ekspluatatsiia kotorykh predusmatrivaet posadku na grunt." *Nauchno-tehnicheskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva* 42-43 (2016): 47–58.
4. Kulesh, V. A. "Nagruzki vzaimodeistviia pri udarakh korpusa sudna o grunt." *Marine Intelligent Technologies* 3-1(33) (2016): 75–80.

5. Girin, S. N., and T. A. Isaeva. "Stability assessment of hull stiffeners with buckled plating." *Transactions of the Krylov State Research Centre SI* (2019): 38–43. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-S-I-38-43.
6. Mano, M., Y. Okumoto, and Y. Takeda. *Practical design of hull structures*. Senpaku Gijutsu Kyoukai, 2000.
7. Hansen, N-E. Ottesen, Bo Cerup Simonsen, and Martin J. Sterndorff. "Soil mechanics of ship beaching." *Coastal Engineering 1994*. 1995. 3030–3044. DOI: 10.1061/9780784400890.2.
8. Pedersen, Preben Terndrup, and Shengming Zhang. "Absorbed energy in ship collision and grounding-Revising Minorsky's Empirical Method." *Journal of Ship Research* 44.2 (2000): 140–154.
9. Kendrick, A., and C. Daley. *Ice Interaction scenarios and load modeling approaches (BMT Report 6007A. DFR submitted to ABS)*. 2006.
10. Simonsen, Bo Cerup. *Mechanics of Ship Grounding*. PhD thesis, Department of Naval Architecture and Offshore Engineering. Technical University of Denmark, 1997.
11. Kulesh, Victor A., and Anatoly I. Azovtsev. "Adaptation experience of ship to the class NAABSA (safely aground)." *Marine Intelligent Technologies* 1-2(47) (2020): 69–76. DOI: 10.37220/MIT.2020.47.1.080.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Герман Андрей Петрович —
 доцент
 Дальневосточный федеральный университет
 690922, Российская Федерация, Владивосток,
 о. Русский, п. Аякс, 10
 email: german.ap@dvfu.ru

Кулеш Виктор Анатольевич —
 доктор технических наук, профессор
 Дальневосточный федеральный университет
 690922, Российская Федерация, Владивосток,
 о. Русский, п. Аякс, 10
 email: vkulesh@mail.ru

Фам Чунг Хиеп – аспирант
Научный руководитель:
 Кулеш Виктор Анатольевич
 Дальневосточный федеральный университет
 690922, Российская Федерация, г. Владивосток,
 о. Русский, п. Аякс, 10
 email: famkhiiep07@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

German, Andrey P. —
 Associate professor
 Far Eastern Federal University
 10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok,
 690922, Russian Federation
 email: german.ap@dvfu.ru

Kulesh, Victor A. —
 Dr. of Technical Sciences, professor
 Far Eastern Federal University
 10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok,
 690922, Russian Federation
 email: vkulesh@mail.ru

Pham Trung Hiep — Postgraduate
Supervisor:
 Kulesh, Victor A.
 Far Eastern Federal University
 10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok,
 690922, Russian Federation
 email: famkhiiep07@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 9 сентября 2020 г.
 Received: September 9, 2020.*

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-926-934

INCREASING THE ENVIRONMENTAL SAFETY OF THE COOLING SYSTEMS FOR SHIP POWER PLANTS DUE TO HEAT RECOVERY

N. K. Fedorovskaya

Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

The cooling system is the most important element of the power plant. Most of these systems in use today consume seawater, often in large quantities. Plankton, eggs and fry contained in seawater enter the cooling system and die. This leads to the destruction of fish resources of the seas and continental reservoirs. In order to improve the environmental safety of cooling systems, it is proposed to utilize the heat removed by the system to the maximum extent. This reduces the required amount of consumed seawater. The various options for heat utilization are analyzed. The temperature levels of the cooling system water and possible heat consumers are taken into account. The results of research on seawater heating in the cooling system are presented. The issue of using water desalination plant is considered in detail. It is taken into account that such an installation itself leads to additional consumption of seawater. An analytical description of thermal processes has been completed. The relation between the ratio of water consumption reduction by the cooling system and additional water consumption by the desalination plant has been obtained. The influence of the blowdown coefficient of the desalination plant has been determined. It has been found that the cooling system reduces consumption by 16-33 times in comparison with the desalination plant. A wider heat recovery is hindered by the relatively low temperature level of the water at the output of the cooling system. It is shown that there are opportunities for greater utilization of heat removed by the cooling system. This is due to the use of heat pumps, which can raise temperatures up to 130 °C and higher. As a result, there is a possibility of transition to deep heat recovery systems. The widespread introduction of heat recovery ensures not only energy efficiency, but also the environmental safety of the cooling systems.

Keywords: power plant, heat recovery, environmental safety, cooling system.

For citation:

Fedorovskaya, Nadezhda K. "Increasing the environmental safety of the cooling systems for ship power plants due to heat recovery." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 12.5 (2020): 926–934. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-926-934.

УДК 629.12 (075.4)

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ЗА СЧЕТ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ

Н. К. Федоровская

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

Рассмотрена система охлаждения, являющаяся важнейшим элементом судовой энергетической установки. Отмечается, что большинство используемых в настоящее время систем потребляет забортную воду зачастую в довольно больших количествах. Содержащиеся в морской воде планктон, икринки и рыбная молодь попадают в систему охлаждения и погибают, что приводит к уничтожению рыбных ресурсов морей и континентальных водоемов. Кроме того, с целью повышения экологической безопасности систем охлаждения предложено в максимальной степени утилизировать отводимую системой теплоту, так как это снижает требуемое количество потребляемой забортной воды. Проанализированы различные варианты утилизации теплоты. Учтены температурные уровни воды системы охлаждения и воз-

возможных потребителей теплоты. Приведены результаты натурных исследований по подогреву забортной воды в системе охлаждения. Детально рассмотрен вопрос использования утилизационной водоопреснительной установки. При этом учитывалось, что такая установка сама приводит к дополнительному потреблению забортной воды. Выполнено аналитическое описание тепловых процессов. Получена зависимость соотношения снижения потребления воды системой охлаждения и дополнительного потребления воды опреснительной установкой. Определено влияние коэффициента продувки водоопреснительной установки. Установлено, что система охлаждения снижает потребление в 16–33 раза по сравнению с опреснительной установкой. Более широкой утилизации теплоты препятствует сравнительно низкий температурный уровень воды на выходе из системы охлаждения. Показано, что имеются возможности большей утилизации теплоты, отводимой системой охлаждения, связанные с использованием тепловых насосов, которые могут поднять температуру до 130 °С и выше. В результате появляется возможность перехода к системам глубокой утилизации теплоты. Широкое внедрение утилизации теплоты обеспечивает не только энергетическую эффективность, но и экологическую безопасность систем охлаждения.

Ключевые слова: энергоустановка, утилизация теплоты, экологическая безопасность, система охлаждения.

Для цитирования:

Федоровская Н. К. Повышение экологической безопасности систем охлаждения судовых энергетических установок за счет утилизации теплоты / Н. К. Федоровская // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 5. — С. 926–934. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-926-934.

Введение (Introduction)

Ввиду того, что системы охлаждения (СО) являются важным элементом судовой энергетической установки (СЭУ), осуществляется постоянный поиск путей повышения их эффективности и экологической безопасности [1]. В забортной воде содержится большое количество планктона, икринок и рыбной молоди. В Мировом океане суммарная масса фитопланктона оценивается в 1,5 млрд т, а зоопланктона — в 20 млрд т. Указанные организмы являются основой пищевой цепочки, разрушение которой неизбежно ведет к биодеградации и снижению рыбной продуктивности морей и континентальных водоемов.

Хорошо известно, что основное количество планктона (55–90 %) сконцентрировано на глубинах до 50 м. С учетом осадки существующих различных судов и морских технических средств системы охлаждения потребляют воду с глубин до 10–20 м [2]. Кроме того, количество потребляемой воды оказывается значительным. Соответствующие примеры приведены в табл. 1.

Таблица 1

Примеры потребления морской воды

Объект	Потребление морской воды, м ³ /ч
1. Морская платформа ЛСП-1	1600 (номинальное), 2000–2400 (максимальное)
2. Морская платформа пр. 10170	400–800
3. Рефрижераторное судно Zenit	460
4. Многоцелевое судно Амке	160

Используемые на судах фильтры забортной воды обычно имеют проходные отверстия не менее 2–4 мм¹. Размеры планктона, икринок и рыбной молоди в большинстве случаев не превышают указанной величины. Поэтому они беспрепятственно попадают в систему охлаждения. В источнике [3] наглядно показано, что значительная часть рассматриваемых организмов после прохождения системы погибает. Существующие рыбозащитные устройства при этом практически неэффективны и не могут решить проблему предотвращения уничтожения планктона, икринок и рыбной молоди [4].

¹ Судовые фильтры: каталог-справочник. СПб.: АО «Центр технологии судостроения и судоремонта» КБ «Армас», 2019. 86 с.

Целью исследования является выявление возможности снижения приема забортной охлаждающей воды и на этой основе снижение отрицательного экологического воздействия на водные биоресурсы. Одним из возможных вариантов достижения этого является уменьшение отводимого системой теплового потока. В рамках реализации данного направления необходимо решение следующих задач:

1. Анализ наиболее перспективных путей утилизации теплоты системы охлаждения.
2. Учет соответствующих тепловых балансов и связанных с этим расходов забортной воды.
3. Оценка соотношения возможного дополнительного потребления забортной воды утилизационным оборудованием по сравнению со снижением этого потребления системой охлаждения.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Известно, что для отвода теплового потока Q необходим прием забортной воды в количестве $W_{3В}$, м³/с:

$$W_{3В} = \frac{Q}{\rho C_p (t''_{3В} - t'_{3В})}, \quad (1)$$

где ρ — плотность забортной воды, кг/м³; C_p — удельная теплоемкость забортной воды, Дж/(кг К); $t''_{3В} - t'_{3В}$ — соответственно температуры входа и выхода забортной охлаждающей воды, °С.

Любое уменьшение Q ведет к снижению потребности в $W_{3В}$. Рассмотрим вопрос утилизации теплоты, отводимой СО, в условиях возможного снижения приема забортной охлаждающей воды и, в конечном счете, сохранения морских биоресурсов.

Утилизация теплоты Q_y позволяет часть теплоты, отводимой системой охлаждения Q , направить на другие потребители, требующие тепловой энергии. В табл. 2 приведены основные возможные потребители утилизируемой теплоты на судне в рамках построения систем малой утилизации теплоты [5], [6].

Таблица 2

Основные потенциальные потребители утилизируемой теплоты на судне

Потребитель теплоты	Температуры подогреваемой среды, °С	Температуры греющей среды, °С	Греющая среда
1. Подогреватель тяжелого топлива главного двигателя	150	170–180	Пар
2. Система отопления, зимнего кондиционирования, подогревателя воздуха	20–40	70–140	Вода, пар
3. Хозяйственно-бытовые нужды	–	70–140	Вода, пар
4. Абсорбционные холодильные установки	–	80–140	Вода, пар
5. Подогрев груза для судов типа танкер (нефть)	40–70	80–140	Вода, пар
6. Система обогрева цистерн топлива, масла, кингстонных ящиков, подогреватели воды	50–80	80–140	Вода, пар
7. Опреснители воды вакуумные	40–42	55–70	Вода

Следует отметить, что потенциально возможность утилизации теплоты контура охлаждения пресной воды ограничена сравнительно невысокой температурой на выходе из двигателя, обычно равной 65–85 °С (большие значения соответствуют более современным двигателям).

В табл. 3 показаны значения $(t''_{3В} - t'_{3В})$, полученные в результате проведенного обследования различных типов судов в различных районах эксплуатации. Как видно, разброс значений $(t''_{3В} - t'_{3В})$ оказывается значительным.

**Подогрев забортной ($t''_{3В} - t'_{3В}$) охлаждающей воды
 на различных судах**

Судно	Установленная мощность, кВт	Нагрев забортной воды ($t''_{3В} - t'_{3В}$), °С
Рефрижератор Zenit	7138	7–18
Рефрижератор Wild Cosmos	9627	16–19
Рефрижератор Wild Plone	3642	11–13
Многоцелевое судно Amke	3840	9–13
Рефрижератор «Ангара»	3089	2–8
Самоходный плавкран «Нептун-3»	1500	5–10
Буксир «Пелла»	ГД	9–15
	ВДГ	2–5

В случае, если обеспечивается утилизация части отводимой системой теплоты, то тепловой поток, отводимый с забортной водой — $Q_{3В}$, Вт,

$$Q_{3В} = Q - Q_y \quad (2)$$

где Q_y — утилизируемый тепловой поток, Вт.

Тогда $Q_{3В}$, Вт,

$$Q_{3В} = \rho C_p W_{3В} (t''_{3В} - t'_{3В}). \quad (3)$$

Уменьшение приема забортной воды вследствие утилизации части теплоты, отводимой системой охлаждения $\Delta W_{3В}$, м³/с,

$$\Delta W_{3В} = \frac{Q}{\rho C_p}. \quad (4)$$

Опреснительные установки широко используются на судах с целью утилизации теплоты СО. Требуемое количество пресной воды на судне зависит от типа судна (транспортное, промышленное, пассажирское и т. п.), вида и мощности СЭУ (ДВС, ПТУ, ГТУ), численности экипажа и пассажиров, автономности плавания и др. Запасы пресной воды приблизительно можно оценить значением 2–8 % от водоизмещения [7]. В среднем суточная потребность в пресной воде для дизельных судов составляет 5–10 т. Для рыбоперерабатывающих судов и пассажирских лайнеров эта величина достигает 100–200 т.

Вакуумные (адиабатные) одноступенчатые утилизационные установки получили наибольшее распространение для утилизации теплоты пресной воды системы охлаждения двигателя. Хорошо известно, что при температурах кипения морской воды более 38–42 °С происходит интенсивное накипеобразование. Благодаря поддержанию пониженного давления, удается обеспечить условия, при которых указанная температура соответствует температуре насыщения воды, что значительно снижает скорость накипеобразования в опреснительной установке.

Максимально возможную производительность опреснительной установки G_{max} , кг/ч, можно оценить по следующей зависимости:

$$G_{max} = \frac{3600 q g_e N_e Q_n^p}{q_n}, \quad (5)$$

где q — доля теплоты, отводимой водой СО; g_e — удельный расход топлива, кг/(кВт·ч); N_e — эффективная мощность двигателя, кВт; Q_n^p — низшая теплотворная способность топлива, Дж/кг; q_n — количество теплоты, необходимой для получения 1 кг дистиллята в одноступенчатой установке, Дж/кг.

Значение q_n , Дж/кг, может быть определено следующим образом:

$$q_n = \left[r + mC_p (t''_{зв} - t'_{зв}) \right] \frac{1}{b};$$

$$q_n = \left[r + mC_p (t''_{звУ} - t'_{звУ}) \right] \frac{1}{b}, \quad (6)$$

где r — удельная теплота парообразования Дж/кг; m — коэффициент продувки ($m = 2,5-3,5$), равный отношению количества питательной заборной воды к производительности опреснителя; C_p — удельная теплоемкость заборной воды, Дж/(кг/К); $t'_{звУ}$ и $t''_{звУ}$ — температуры заборной воды, соответственно, на входе и выходе утилизационной установки, °С; b — коэффициент учета тепловых потерь в окружающую среду (примерно равен 0,98).

Адиабатные водоопреснительные установки подразделяются на проточные и циркуляционные. В *проточных установках* неиспарившаяся в камере заборная вода удаляется рассольным насосом за борт. В *циркуляционных установках* неиспарившаяся морская вода циркуляционным насосом вновь подается в подогреватель. Это приводит к тому, что значение коэффициента продувки m в зависимости (6) оказывается для проточных установок больше по сравнению с циркуляционными. Соответственно удельный расход теплоты в проточных установках оказывается относительно большим, так как часто до 98–99 % нагретой воды удаляется за борт. В циркуляционных установках удельный расход теплоты в 2–4 раза меньше по сравнению с проточными. Соответственно для обеспечения требуемой производительности опреснительной установки в последнем случае требуется принимать меньше заборной воды. С учетом поставленной задачи поиска путей максимально возможного снижения приема заборной воды установки данного типа являются более предпочтительными.

Использование теплоты, отводимой СО с целью ее утилизации в опреснительной установке, имеет свои особенности. С одной стороны, это приводит к снижению теплоотвода системой охлаждения заборной водой, а следовательно, к снижению потребления этой воды ΔW , а с другой стороны, опреснительная установка сама потребляет заборную воду $W_{звУ}$, что в аспекте рассматриваемой проблемы максимально возможного снижения потребления заборной воды является отрицательным фактором. Следует исследовать вопрос соотношения ΔW и $W_{звУ}$, поскольку при $\Delta W \leq W_{звУ}$ с экологической позиции не достигается требуемый результат. На рис. 1 показана схема СО с принятыми обозначениями в случае использования утилизационной водоопреснительной установки.

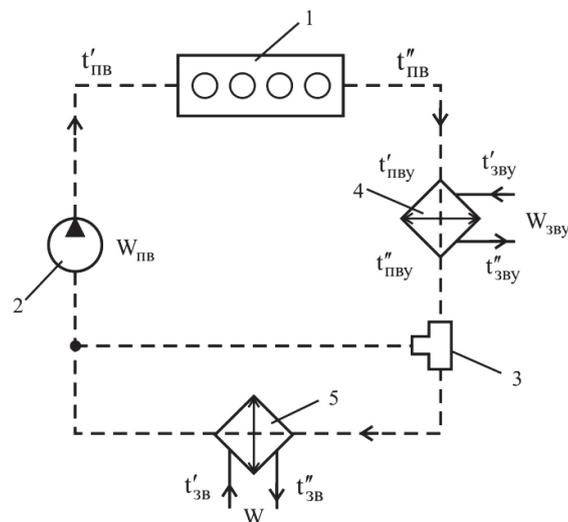


Рис. 1. Утилизационная водоопреснительная установка в составе системы охлаждения:

- 1 — охлаждаемый двигатель; 2 — насос; 3 — терморегулятор;
- 4 — утилизационный водоопреснитель;
- 5 — теплообменник отвода теплоты в заборную воду

Из контура охлаждения пресной воды тепловой поток Q_y , Вт, забирается с целью утилизации:

$$Q_y = W_{\text{пв}} \rho C_p (t''_{\text{пв}} - t'_{\text{пв}}), \quad (7)$$

где $t''_{\text{пв}} - t'_{\text{пв}}$ — температура пресной воды системы охлаждения, соответственно, на выходе и входе в утилизационную опреснительную установку, °С.

Величина утилизованного теплового потока Q_y , Вт, может быть записана в следующем виде:

$$Q_y = \Delta W \rho C_p. \quad (8)$$

Эта же теплота расходуется в утилизационной опреснительной установке Q_y , Вт, на подогрев жидкости до температуры насыщения и парообразование:

$$Q_y = [r + m C_p (t''_{\text{зв}} - t'_{\text{зв}})] \frac{W_{\text{оп.б}} \rho}{b}, \quad (9)$$

где $W_{\text{оп.б}}$ — количество вырабатываемой утилизационной установкой пресной воды, м³/с.

Приравняв правые части выражений (4) и (6), получим

$$\Delta W C_p = [r + m C_p] \frac{W_{\text{оп.б}}}{b}. \quad (10)$$

Принимая во внимание, что

$$W_{\text{оп.б}} = \frac{W_{\text{зв}}}{m}, \quad (11)$$

получим

$$\Delta W = \frac{1}{b} \left[r \frac{W_{\text{зв}}}{m} + W_{\text{зв}} C_p \right] \quad (12)$$

и окончательно учитывая, что $t'_{\text{зв}} = t'_{\text{зв}}$, получим

$$\frac{\Delta W}{W_{\text{зв}}} = \frac{\left(\frac{r}{m} + C_p \right)}{b C_p}. \quad (13)$$

Результаты (Results)

Полученная зависимость позволяет оценить соотношение изменения ΔW относительно $W_{\text{зв}}$. Если принять температуру кипения заборной воды в опреснительной установке $t''_{\text{зв}} = 40$ °С, то в установке должно поддерживаться давление $0,07 \cdot 10^5$ Па, а величина $r = 2407 \cdot 10^3$ Дж/кг. Теплоемкость воды C_p известна.

Для определения значения $(t''_{\text{зв}} - t'_{\text{зв}})(t''_{\text{зв}} - t'_{\text{зв}})$ воспользуемся данными относительно этой величины, приведенными в табл. 2. Значения $(t''_{\text{зв}} - t'_{\text{зв}})$ колеблются в пределах 2–19°. Для дальнейших оценочных расчетов примем эту величину равной 10°.

На рис. 2 показана зависимость отношения $\frac{\Delta W}{W_{\text{зв}}}$ от температуры заборной воды $t'_{\text{зв}}$.

Наглядно видно, что достигаемое снижение потребления заборной воды ΔW в 16–33 раза больше потребления морской воды с целью ее опреснения в утилизационной установке. Это связано с тем, что затраты теплоты на обеспечение фазового перехода, связанного с кипением заборной охлаждаемой воды, существенно больше затрат теплоты на доведение воды до температуры насыщения.

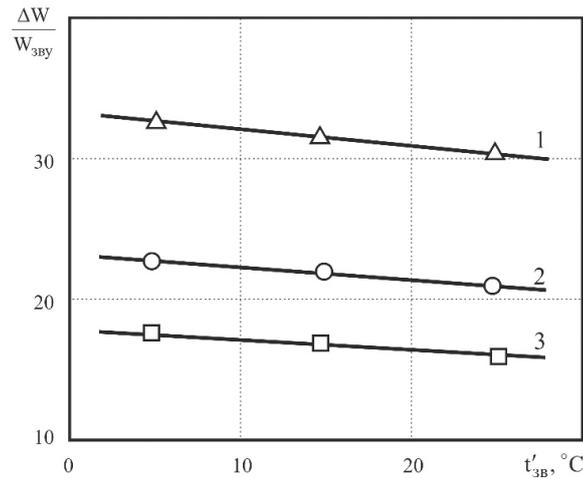


Рис. 2. Зависимость $\frac{\Delta W}{W_{звУ}}$ от температуры забортной воды $t'_{зв}$:

1 — $m = 2$; 2 — $m = 3$, 3 — $m = 4$

На рис. 3 показана зависимость отношения $\frac{\Delta W}{W_{звУ}}$ от коэффициента продувки m , увеличение

которого приводит к снижению данного отношения.

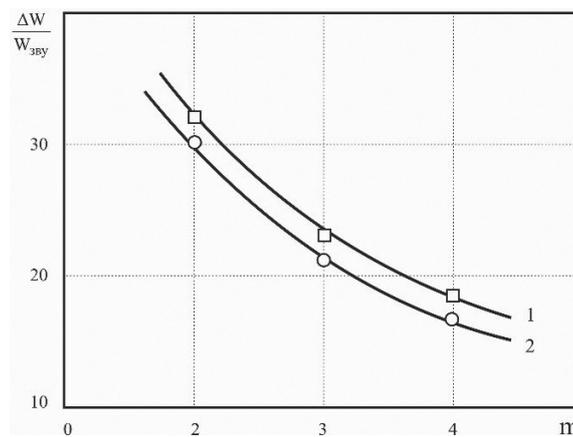


Рис. 3. Зависимость от коэффициента продувки m :

1 — $t'_{зв} = 5^\circ\text{C}$; 2 — 25°C

Обсуждение (Discussion)

Поскольку снижение потребления системой охлаждения забортной воды $\frac{\Delta W}{W_{звУ}}$ существенно превышает дополнительное потребление забортной воды опреснительной установкой $W_{звУ}$, это свидетельствует о целесообразности с экологической позиции данного способа снижения приема забортной охлаждающей воды.

Вода системы охлаждения обладает сравнительно невысоким температурным потенциалом, что ограничивает возможности использования ее теплоты. Кроме того, опреснительная установка обычно не работает постоянно, а лишь предназначена для восполнения имеющихся запасов пресной воды. Поэтому утилизация теплоты с ее помощью имеет в основном периодический характер. Однако в настоящее время существуют технические решения, позволяющие обеспечить повышение температурного уровня, например, за счет использования тепловых насосов, что с достаточной степенью подробности рассмотрено в работах [2], [8], [9]. В частности, в работе [9] подробно рассмотрен вопрос дополнительных возможностей утилизации теплоты системы охлаждения. Отмечается, что для систем охлажде-

ния и смазки, температуры в которых редко превышают 80–90 °С, могут быть использованы тепловые насосы. Обосновывается, что при этом могут быть достигнуты температуры до 130 °С и выше. В этой связи существенно расширяется спектр возможного использования данной теплоты. В частности, показано, что за счет применения теплового насоса с использованием в качестве теплоносителя органического вещества R113 можно заменить автономный котел системы подогрева груза с требуемой температурой подогрева 160 °С. При этом обеспечивается относительная экономия топлива 24 %. Показано, что за счет утилизации теплоты системы охлаждения при использовании низкокипящих органических теплоносителей при реализации цикла Ренкина возможна генерация электроэнергии в объеме до 3–5 % от мощности двигателя. Фактически, речь идет о получении энергии качественно более высокого уровня. Однако в данном случае необходим отвод теплоты, что с термодинамической точки зрения наиболее целесообразно выполнить в забортную воду. Это означает, что требуемое дополнительное потребление забортной воды является отрицательным фактором в аспекте решения экологической проблемы посредством максимально возможного снижения такого потребления. По данным [7], в испарителе теплонасосной установки, за счет энергоемкого процесса фазового перехода (испарения хладагента), можно снизить температуру горячей пресной воды на 6–10 °С.

Анализ представленных в [9] результатов позволяет сделать вывод о том, что утилизация отводимой системой охлаждения теплоты посредством использования тепловых насосов позволяет снизить теплоотвод примерно на 5–10 %. С учетом зависимости (4) будет достигнуто также соответствующее снижение приема забортной охлаждающей воды. Следует отметить, что возможны различные схемы реализации некоторых из представленных в работе [8] методов.

Заключение (Conclusion)

Утилизация теплоты, отводимой системой охлаждения, является эффективным средством не только повышения эффективности энергетической установки, но и ее экологической безопасности. Использование утилизационных водоопреснительных установок в условиях имеющихся температурных уровней охлаждающей воды системы обоснованно и позволяет существенно снизить прием забортной воды по сравнению с дополнительным приемом этой воды для целей водоопреснения. Показано, что имеются дальнейшие возможности увеличения доли утилизируемой теплоты посредством использования тепловых насосов, обеспечивающих повышение температурного уровня теплоносителя. Совершенно очевидно, что при этом происходит усложнение системы, увеличение ее стоимости, массы и габаритов. Поэтому выбор тех или иных подходов в направлении максимальной утилизации теплоты должен базироваться на соответствующем технико-экономическом обосновании. При этом обязательным является учет экологического фактора, связанного с описанным в данном исследовании негативным воздействием на рыбные ресурсы приема забортной охлаждающей воды. Реализация данного условия может быть достигнута за счет применения интегрального показателя эффективности, учитывающего наряду с техническими и экологический показатель [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков В. А. Перспективы совершенствования систем охлаждения судовых дизелей / В. А. Жуков // Вестник государственного университета морского и речного флота им. Адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 131–137.
2. Федоровский К. Ю. Замкнутые системы охлаждения судовых энергетических установок / К. Ю. Федоровский, Н. К. Федоровская — М.: ИНФРА-М, 2017. — 163 с.
3. Федоровская Н. К. Отрицательное антропогенное воздействие систем охлаждения энергоустановок и пути его преодоления / Н.К. Федоровская // Научные проблемы водного транспорта. — 2020. — № 63 (63). — С. 193–201. DOI: 10.37890/jwt.vi63.89.
4. Ващинников А. Е. Новые направления в разработке сетчатых рыбозащитных устройств / А. Е. Ващинников [и др.] // Материалы докладов 4-й Всероссийской конференции с международным участием. — Борок: Акварос, 2010. — С. 9–13.
5. Волынец А.В. Утилизация тепловых ресурсов главного судового двигателя посредством использования теплонасосной установки / А. В. Волынец, А. Н. Соболенко // Вестник государственного университета

морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2016. — № 5 (39). — С. 144–150. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-144-150.

6. Смирнов М. Н. Утилизация теплоты от судовой энергетической установки на примере двигателя внутреннего сгорания / М. Н. Смирнов // Молодой ученый. — 2017. — № 4. — С. 38–41.

7. Давыдов В. Г. Судовые опреснительные установки / В. Г. Давыдов [и др.]— СПб. : Изд. центр Мор. техн. ун-та, 1996. — 107 с.

8. Андреев А. А. Утилизация вторичных тепловых ресурсов судовых ДВС / А. А. Андреев // Двигатели внутреннего сгорания. — 2006. — № 2. — С. 149–154.

9. Ерофеев В. Л. О возможностях использования вторичных энергетических ресурсов в судовых ДВС / В. Л. Ерофеев, В. А. Жуков, О. В. Мельник // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 570–580. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-570-580.

10. Федоровская Н. К. Учет экологического фактора при оценке эффективности систем охлаждения судовых энергетических установок / Н. К. Федоровская, К. Ю. Федоровский, В. В. Ениватов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2020. — № 4 (342). — С. 157–160.

REFERENCES

1. Zhukov, V. A. “Prospects for improving the cooling systems of ship diesel engines.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(32) (2015): 131–137.

2. Fedorovskii, K. Yu., and N. K. Fedorovskaya. *Zamknutyie sistemy okhlazhdeniya sudovykh energeticheskikh ustanovok*. M.: INFRA-M, 2017.

3. Fedorovskaya, Nadezhda K. “Negative anthropogenic influence of cooling systems of power plants and ways of its overcoming.” *Russian Journal of Water Transport* 63(63) (2020): 193–201. DOI: 10.37890/jwt.vi63.89.

4. Vashchinnikov, A. E., A. A. Vasil’ev, K. V. Ilyushin, and V. D. Shul’gin. “Novye napravleniya v razrabotke setchatykh rybozashchitnykh ustroystv.” *Materialy dokladov 4-i Vseros. konf. s mezhdunarodnym uchastiem*. Borok: Akvaros, 2010. 9–13.

5. Volintsev, Aleksandr Vladislavovich, and Anatolij Nikolaevich Sobolenko. “Utilization of main ship engine heat resources by means of heat pump installation usage.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(39) (2016): 144–150. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-144-150.

6. Smirnov, M. N. “Utilizatsiya teploty ot sudovoi energeticheskoi ustanovki (SEU) na primere dvigatelya vnutrennego sgoraniya (DVS).” *Molodoi uchenyi* 4 (2017): 38–41.

7. Davydov, V. G., V. F. Didenko, and V. A. Chistyakov. *Sudovye opresnitel’nye ustanovki*. SPb.: Izd. tsentr Mor. tekhn. un-ta, 1996.

8. Andreev, A. A. “Utilizatsiya vtorichnykh teplovykh resursov sudovykh DVS.” *Dvigateli vnutrennego sgoraniya* 2 (2006): 149–154.

9. Erofeyev, Valentin L., Vladimir A. Zhukov, and Olesya V. Melnik. “On the possibilities of using secondary energy resources in marine engine.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.3 (2017): 570–580. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-570-580

10. Fedorovskaya, N. K., K. Yu. Fedorovskiy, and V. V. Enivatov. “Taking into account the ecological factor in assessing the efficiency of cooling systems for ship power plants.” *Fundamental and applied problems of engineering and technology* 4(342) (2020): 157–160.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Федоровская Надежда Константиновна — преподаватель, аспирант
Научный руководитель:
Федоровский Константин Юрьевич — д-р техн. наук, проф.
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»
299053, Российская Федерация, Севастополь,
ул. Университетская, 33
e-mail: n.fedorovskaya14@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Fedorovskaya, Nadezhda K. — Lecturer, postgraduate
Supervisor:
Fedorovsky, Konstantin Yu.
Dr. of Technical Sciences, professor
Sevastopol State University
33 Universitetskaya Str., Sevastopol, 299053,
Russian Federation
e-mail: n.fedorovskaya14@mail.ru

Статья поступила в редакцию 7 сентября 2020 г.
Received: September 7, 2020.

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-935-944

SIMULATION OF DESIGN LOADS, ACTING FROM THE SIDE OF THE TRAWL SYSTEM ON THE FISHING VESSEL WINCH

A. V. Ivanovskaya¹, V. A. Zhukov²

¹ — Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russian Federation

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

Deck auxiliary machinery is of paramount importance in fishing vessel survivability and safety, as well as in performing technological operations in accordance with its type. Such machinery includes fishing winches, drift-net heaving systems, anchor and mooring machines, and general-purpose lifting devices. They must be reliable, economical, environmentally friendly, along with having variable operational modes and the ability to smooth power and performance regulation. Fishing vessel lifting equipment simulation and design is based on predicting operational loads, which are random processes. Meanwhile, the design loads are deterministic maximum or typical values, determined with some assurance. The complexity of such operational loads mathematical simulation is conditioned by unsteady motion of the “ship - lifting device - cargo system” system, which arises due to the system elements parameters variability, the external hydrometeorological factors influence etc. The standards, existing in the Russian Federation for calculating loads acting on lifting equipment, either do not apply to ships onboard devices, or transient loads that may occur even under steady-state operating conditions are not taken into account. Hence, a number of researches are aimed at calculating and designing principles and methods for operational loads formation, acting on the fishing vessel lifting equipment. The developed classifications for such kind of equipment by loads criteria, occurrence frequency and their combinations are presented in this paper. The proposed “ship - lifting device - cargo system” system schematization of the flat one-wire system form and the known mechanics laws application to it will allow to obtain dynamics mathematical description of such a complex, that is sufficiently complete for practical use. Therefore, the flexible thread replacing, describing the trawl warp in the rod form system with n links, hingedly connected to each other and performing oscillatory movements is proposed. As a simulation and calculation example, rods vibrations system is described, motion and secular equations are obtained, as well as vibrations eigenmodes are constructed.

Keywords: deck equipment, transient motion, operational loads, framed structure.

For citation:

Ivanovskaya, Aleksandra V., and Vladimir A. Zhukov. “Simulation of design loads, acting from the side of the trawl system on the fishing vessel winch.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.5 (2020): 935–944. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-935-944.

УДК: 629.12

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ НАГРУЗОК, ДЕЙСТВУЮЩИХ СО СТОРОНЫ ТРАЛОВОЙ СИСТЕМЫ НА ЛЕБЕДКУ РЫБОПРОМЫСЛОВОГО СУДНА

А. В. Ивановская¹, В. А. Жуков²

¹ — ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», Керчь, Российская Федерация

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

Отмечается, что на рыбопромысловых судах палубные вспомогательные механизмы играют большую роль в обеспечении живучести судна, его безопасности, а также выполнении технологических операций в соответствии с назначением судна. К таким механизмам относятся: промысловые лебедки,

неводовыборочные комплексы, якорно-швартовные механизмы и грузоподъемные устройства общего назначения — механизмы, которые должны быть надежными, экономичными, экологичными, работать на переменных режимах, иметь возможность плавного регулирования производительности и мощности. Моделирование и проектирование грузоподъемного оборудования рыбопромыслового судна, основанные на прогнозировании эксплуатационных нагрузок, представляют собой случайные процессы. Сложность математического моделирования таких эксплуатационных нагрузок обусловлена нестационарным движением системы: судно – грузоподъемное устройство – грузовая система, которое возникает за счет переменных значений параметров элементов системы, а также влияния внешних гидрометеорологических факторов. Подчеркивается, что существующие в Российской Федерации стандарты по расчету действующих на грузоподъемное оборудование нагрузок не распространяются на устройства, находящиеся на морских судах либо в них не учитываются нестационарные нагрузки, которые могут возникать даже при установившемся режиме работы. Поэтому предлагаемое исследование направлено на формирование принципов и методов расчета и проектирования эксплуатационных нагрузок, действующих на грузоподъемное оборудование рыбопромыслового судна. В работе представлены классификации для такого рода оборудования по критериям нагрузок, по частоте их появления и их комбинациям. Предложенная схематизация «судно – грузоподъемное устройство – грузовая система» в виде плоской одноаерной системы применительно к известным законам механики позволит получить достаточно полное для практического использования математическое описание динамики работы такого комплекса. Для этого в рассматриваемой системе предлагается замена гибкой нити, описывающей ваер в виде стержневой системы с n -звеньями, шарнирно соединенными между собой и совершающими колебательные движения. В качестве примера моделирования и расчета описаны колебания системы стержней, получены уравнения движения и вековые уравнения, построены собственные формы колебаний.

Ключевые слова: палубное оборудование, нестационарное движение, эксплуатационные нагрузки, стержневая система.

Для цитирования:

Ивановская А. В. Моделирование расчетных нагрузок, действующих со стороны траловой системы на лебедку рыбопромыслового судна / А. В. Ивановская, В. А. Жуков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 5. — С. 935–944. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-935-944.

Введение (Introduction)

Буксировка объекта является одной из составляющих многих технологических процессов. Примером является буксировка нефтяной платформы, морского судна, надводного и подводного аппарата, гидролокационных станций, трала при разминировании, орудия лова (трал). Основным управляющим параметром служит длина ваера — троса, с помощью которого осуществляется буксировка. В процессе буксировки лебедка выбирает ваера или их отдает. Для выработки оптимального способа управления буксировкой объекта необходимо знать закон изменения натяжения ваера. Без решения этой задачи невозможно осуществить планирование операции буксировки и управление ею.

Неотъемлемую часть судна составляют судовые вспомогательные механизмы (СВМ). Живучесть судна, безопасность плавания и выполнение технологических операций в соответствии с его назначением напрямую зависит от надежности СВМ. Особую роль на рыбопромысловом судне играют палубные механизмы, к которым относятся промысловые лебедки, неводовыборочные комплексы, якорно-швартовные механизмы, а также грузоподъемные механизмы общего назначения. Поэтому к оборудованию такого рода предъявляются требования надежности, экономичности, устойчивости при работе на переменных режимах, возможности плавного регулирования производительности и мощности [1], [2].

Моделирование и проектирование палубного оборудования рыбопромыслового судна основано на прогнозировании эксплуатационных нагрузок, которые представляют собой случайные процессы. Расчетными нагрузками будут максимальные или типичные с определенной достоверностью полученные детерминированные значения эксплуатационных нагрузок. Сложностью математического моделирования такого рода грузоподъемного оборудования является описание его работы, протекающей зачастую в «особых условиях».

В качестве «особых условий» следует рассматривать воздействие ветра, качки, изменение параметров системы *трос – груз* (его формы, массы, гидродинамического и инерционного коэффициентов, длины троса), переход из одной среды в другую [3], [4], а также учет характеристик рыбопромысловых снастей [5], [6]. Различные подходы к моделированию эксплуатационных режимов грузоподъемного оборудования и контроля состояния оборудования рассмотрены в работах [7]–[9], принципы выбора палубного оборудования — в публикации [10].

В настоящее время при разработке и проектировании судового палубного оборудования актуальной является *задача импортозамещения*, решаемая созданием эффективных и надежных палубных механизмов на отечественных предприятиях [11], [12]. В Российской Федерации разработаны и действуют стандарты, регламентирующие расчет действующих на грузоподъемное оборудование нагрузок. Такими нормативными документами являются:

1. ГОСТ 32579.1–2013 «Краны грузоподъемные. Принципы формирования расчетных нагрузок и комбинаций нагрузок»¹, который, однако, не предусмотрен для расчета нагрузок, действующих на грузоподъемные устройства, действующие на морских судах.

2. «Правила по грузоподъемным устройствам морских судов» Российского морского регистра судоходства^{2, 3}, в которых описаны расчетные схемы и принципы формирования расчетных нагрузок. При этом усилия определяются для самых неблагоприятных движений каждого элемента, т. е. на переходных режимах работы. Однако нестационарные нагрузки могут возникать и при устоявшемся режиме работы грузоподъемного оборудования рыбопромыслового судна, например, при буксировке орудия лова с уловом. Поэтому исследования, направленные на совершенствование системы привода грузоподъемных устройств рыбопромыслового судна, являются актуальными.

Целью исследования является разработка метода расчета действующих на грузоподъемное оборудование рыбопромыслового судна нагрузок со стороны траловой системы.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В основе принципов формирования действующих расчетных нагрузок может находиться классификация по следующим признакам [13]:

1. *По критериям нагрузок:*

- группа I — ограничение долговечности элементов оборудования;
- группа II — нарушение работоспособности;
- группа III — нарушение нормальной эксплуатации.

2. *По частоте появления:*

- регулярные;
- нерегулярные;
- исключительные;
- особые.

К регулярным нагрузкам относятся все нагрузки, имеющие место при штатной работе грузоподъемного оборудования в нормальных гидрометеорологических условиях. Однако для палубного оборудования рыбопромыслового судна при расчете таких нагрузок учитываются изменения параметров тросовой и грузовой части, а также гидродинамического сопротивления всей траловой системы. Нерегулярные нагрузки описываются аналогично регулярным, но с учетом переменных гидрометеорологических условий. Исключительные и особые нагрузки возникают при авариях, испытаниях, транспортировке оборудования, его монтаже / демонтаже.

¹ ГОСТ 32579–2013. Межгосударственный стандарт. Краны грузоподъемные. Принципы формирования расчетных нагрузок и комбинаций нагрузок. Введ. 2015-06-01. М.: Стандартинформ, 2015.

² Российский морской регистр судоходства. Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов (в 4 т). Т. 4. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2016. 337 с.

³ Российский морской регистр судоходства. Правила по грузоподъемным устройствам морских судов. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2016. 79 с.

3. По комбинации эксплуатационных нагрузок их можно условно разделить на группы А, Б и В с делением на подгруппы, описывающие все режимы работы оборудования или его состояния с учетом указанных в пп. 1 и 2 видов классификации.

Рассмотрим связь тягового усилия рыболовной лебедки с параметрами движения траловой системы. В задачах управления движения траловой системы вытравленный ваер целесообразно рассматривать как нить переменной длины, а весь траловый комплекс можно представить в виде плоской одноаерной схематизации (рис. 1), в состав которой входят: грузоподъемное устройства (в виде материальной точки A), ваер (в виде гибкой весомой нити AD), распорная доска (в виде материальной точки D), кабель (в виде стержня DT) и трал (в виде материальной точки T). На схеме условно обозначены: R_B и P_B , R_D и P_D , R_T и P_T — сила гидродинамического сопротивления и приведенный вес ваера, распорной доски и трала соответственно. Под действием всех представленных сил данная механическая система находится в равновесном положении и принимает определенную конфигурацию.

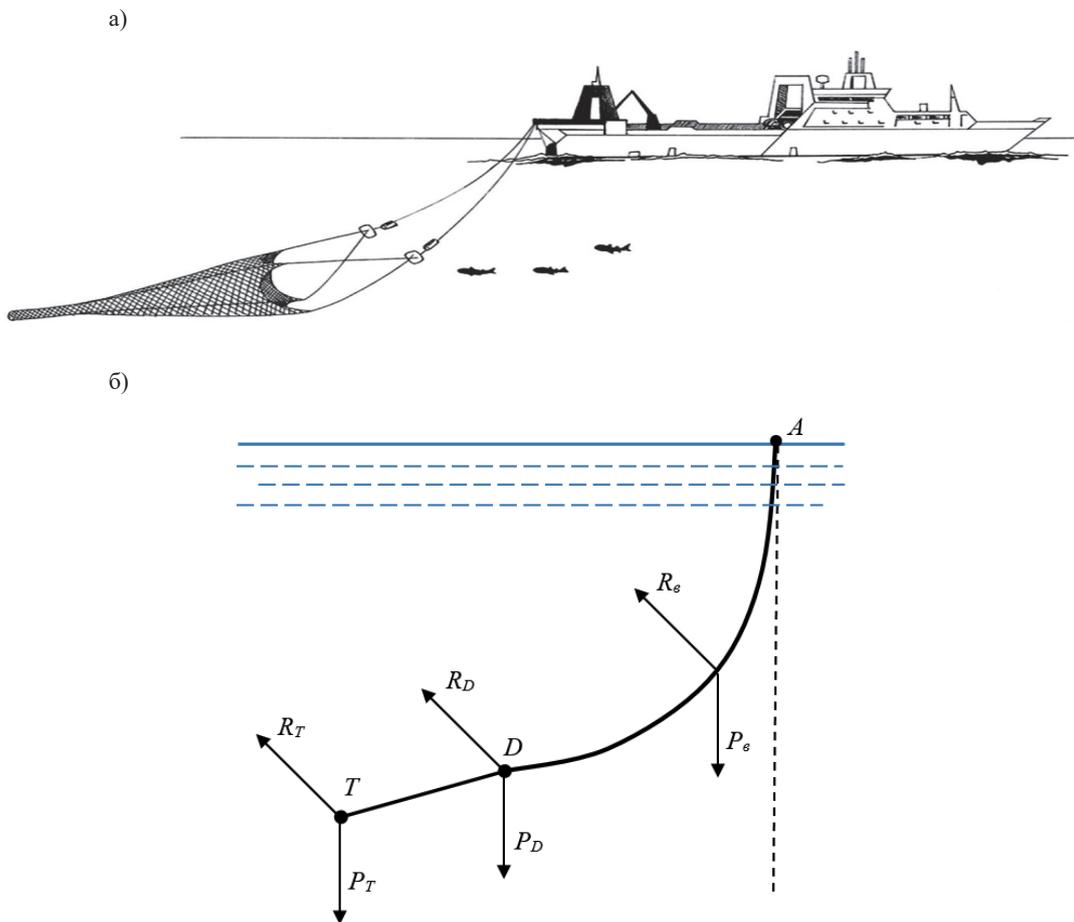


Рис. 1. Траловый комплекс (а) и его плоская одноаерная схематизация (б)

При изменении скорости хода судна, длины вытравленных ваеров, система: судно – грузоподъемное устройство – грузовая система совершает нестационарное движение. В этом случае переменными будут являться: расстояние между точками подвеса ваера, длина ваера, его форма, гидродинамическое сопротивление. Возникающие при этом нестационарные нагрузки оказывают негативное влияние на работоспособность и надежность привода грузоподъемного оборудования. Тогда описание тросовой части системы гибкой нерастяжимой нитью становится практически нецелесообразным и возникает необходимость создания другой модели. Для создания такой модели такой модели предложена замена гибкой нити стержнем, имеющим такую же длину, как и ваер, и шарнирно закрепленным в точке D с кабелем DT (рис. 2) [14]. Однако математическая модель по-

добного стержня не даст достаточно точного описания динамики движения ваера. Поэтому для моделирования такой системы заменим гибкую нить стержневой системой с n звеньями (рис. 3).

Будем считать, что точка подвеса ваеров A находится в кормовой оконечности судна. Представим гибкую нить AD длиной L в виде системы стержней $AD_1, \dots, D_{i-1}D_i$ ($i = \overline{1, n}$), в которой звенья шарнирно соединены между собой (см. рис. 2). Пусть стержни являются однородными, имеют одинаковую длину $2l$ и один вес $P = 2ql$, где q — масса единицы длины стержня. Рассмотрим движение системы стержней в вертикальной плоскости около равновесного положения Ay , где первый стержень AD_1 совершает малые колебания вокруг оси A , а все последующие стержни — вокруг шарниров D_i . Полагаем, что все связи голономные, идеальные и стационарные, а силы, действующие на точки системы, — потенциальные.

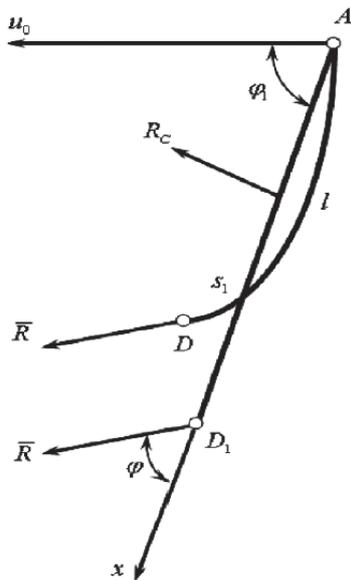


Рис. 2. Стержневая модель ваера

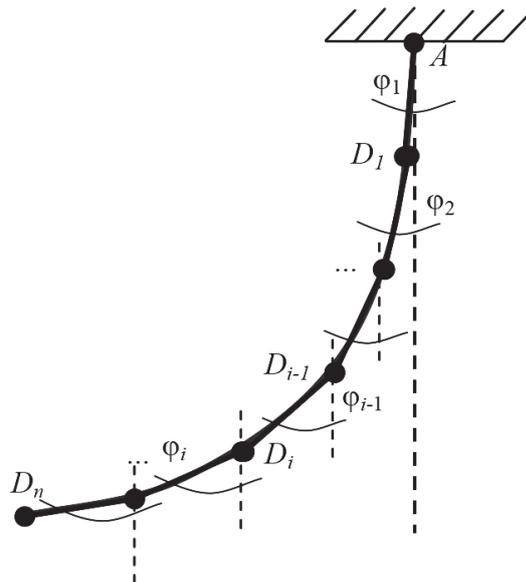


Рис. 3. Гибкая нить в виде стержневой системы

Рассматриваемая система имеет n степеней свободы. За обобщенные координаты примем углы отклонения стержней от вертикали φ_i , которые в положении устойчивого равновесия полагаются по Ay и имеют нулевое значение. Согласно принципу Даламбера, во время движения приложенные в качестве внешних обобщенные силы инерции вместе с упругими восстанавливающими силами удовлетворяют условиям равновесия. Поэтому уравнения Лагранжа для малых колебаний, которые также являются условиями равновесия, можно записать следующим образом:

$$\left[-\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{\varphi}_i} \right) \right] + \left[-\frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_i} \right] = 0, \quad (i = \overline{1, n}). \quad (1)$$

В данном случае кинетическая энергия системы равна сумме кинетических энергий каждого стержня. Так, кинетическая энергия стержня AD_1 , вращающегося вокруг оси A , будет

$$K_1 = \frac{1}{2} I_A \dot{\varphi}_1^2 = \frac{2}{3} P l^2 \dot{\varphi}_1^2, \quad (2)$$

где I_A — момент инерции стержня AD_1 относительно оси A .

Для остальных стержней $D_{i-1}D_i$, шарнирно соединенных между собой, кинетическая энергия равна сумме кинетической энергии центра инерции стержня C_i , в котором сосредоточена вся его масса и кинетической энергии в относительном перемещении его вокруг центра инерции:

$$K_i = \frac{P}{2g} (\dot{x}_{C_i}^2 + \dot{y}_{C_i}^2) + \frac{1}{2} I_{C_i} \dot{\varphi}_i^2, \quad (3)$$

где I_{C_i} — момент инерции стержня $D_{i-1} D_i$ относительно центра C_i , $I_{C_i} = \frac{P l^2}{g 3}$;

x_{C_i} и y_{C_i} — координаты середины i -го стержня C_i .

Приведенные ранее координаты определяются в соответствии со следующими выражениями:

$$x_{C_i} = l(2\sin \varphi_{i-1} + \sin \varphi_i); \quad (4)$$

$$y_{C_i} = l(2\cos \varphi_{i-1} + \cos \varphi_i) \quad (i = \overline{1, n}). \quad (5)$$

Учитывая, что система совершает малые колебания, то в разложении $\cos(\varphi_1 - \varphi_2)$ можно ограничиться только одним членом и $\cos(\varphi_1 - \varphi_2) \approx 1$. Тогда после преобразований получим зависимость для кинетической энергии для i -го стержня:

$$K_i = \frac{Pl^2}{2g} \left[(2\dot{\varphi}_{i-1} + \dot{\varphi}_i)^2 + \frac{1}{3} \dot{\varphi}_i^2 \right]. \quad (6)$$

В результате суммарная кинетическая энергия всей стержневой системы

$$K = \frac{2P}{3g} l^2 \dot{\varphi}_1^2 + \frac{Pl^2}{2g} \sum_{i=1}^n \left[(2\dot{\varphi}_{i-1} + \dot{\varphi}_i)^2 + \frac{1}{3} \dot{\varphi}_i^2 \right]. \quad (7)$$

Потенциальная энергия определяется работой весов при перемещении системы из текущего положения в вертикальное положение равновесия. Так, потенциальная энергия для i -го стержня и всей стержневой системы, соответственно, определяется в виде:

$$\Pi_i = Pl \left[2(1 - \cos \varphi_{i-1}) + (1 - \cos \varphi_i) \right]; \quad (8)$$

$$\Pi = Pl \sum_{i=1}^n \left[i^2 - (2i - (2i - 1)\cos \varphi_i) \right]. \quad (9)$$

После разложения в ряд Тейлора по степеням φ , начиная со второго члена относительно φ_i , получим

$$\Pi = Pl \sum_{i=1}^n \frac{9 - 2i}{2} \varphi_i^2. \quad (10)$$

Уравнения колебаний запишем в обратной форме:

$$\frac{9 - 2i}{2} \varphi_i = \frac{l}{g} \left[-\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{\varphi}_i} \left\{ \frac{2}{3} \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[(2\dot{\varphi}_{i-1} + \dot{\varphi}_i)^2 + \frac{1}{3} \dot{\varphi}_i^2 \right] \right\} \right) \right]. \quad (11)$$

Результаты (Results)

Для примера исследования будем вести для стержневой системы, состоящей из двух-четырёх стержней. Решение подобного рода систем следует находить, исходя из предположения о том, что стержневая система совершает одно из главных колебаний, которые можно записать в виде

$$\varphi_i = \lambda_i \sin(pt + \varepsilon), \quad (12)$$

где λ_i — угловые амплитуды колебаний; p — собственные частоты колебаний.

Собственные частоты и амплитуды, количество которых соответствует числу степеней свободы исследуемой стержневой системы, получим из вековых уравнений. Графически малые колебания системы можно представить в виде соответствующих собственных форм. Так, для двухстержневой системы уравнение колебаний и вековое уравнение, соответственно, запишем в виде:

$$\begin{cases} 3\varphi_1 = -\frac{16l}{3g}\ddot{\varphi}_1 - 2\frac{l}{g}\ddot{\varphi}_2; \\ \varphi_2 = -2\frac{l}{g}\ddot{\varphi}_1 - \frac{4l}{3g}\ddot{\varphi}_2; \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{vmatrix} \frac{16l}{9g} - \frac{1}{p^2} & \frac{2l}{g\sqrt{3}} \\ \frac{2l}{g\sqrt{3}} & \frac{4l}{3g} - \frac{1}{p^2} \end{vmatrix} = 0. \quad (14)$$

Результаты расчета для двух-, трех- и четырехзвенной системы стержней представлены в следующей таблице:

Характеристики колебаний стержневой системы

Собственные частоты	Отношения угловых амплитуд	Собственные формы колебаний
$n = 2$		
$p_1 = 0,61\sqrt{\frac{g}{l}}$	$\varphi_{11} : \varphi_{12} = 2 : 2,73$	
$p_2 = 1,62\sqrt{\frac{g}{l}}$	$\varphi_{21} : \varphi_{22} = 2 : -4,2$	
$n = 3$		
$p_1 = 2,33\sqrt{\frac{g}{l}}$	$\varphi_{11} : \varphi_{12} : \varphi_{13} = 0,45 : 0,6 : 0,67$	
$p_2 = 0,46\sqrt{\frac{g}{l}}$	$\varphi_{21} : \varphi_{22} : \varphi_{23} = 0,33 : -0,02 : -0,95$	
$p_3 = 1,24\sqrt{\frac{g}{l}}$	$\varphi_{31} : \varphi_{32} : \varphi_{33} = 0,35 : -0,7 : 0,63$	
$n = 4$		
$p_1 = 0,9\sqrt{\frac{g}{l}}$	$\varphi_{11} : \varphi_{12} : \varphi_{13} : \varphi_{14} = 0,32 : 0,4 : 0,5 : 0,7$	
$p_2 = 1,5\sqrt{\frac{g}{l}}$	$\varphi_{21} : \varphi_{22} : \varphi_{23} : \varphi_{24} = 0,2 : 0,15 : -0,07 : -1$	
$p_3 = 0,42\sqrt{\frac{g}{l}}$	$\varphi_{31} : \varphi_{32} : \varphi_{33} : \varphi_{34} = 0,4 : -0,02 : -0,8 : 0,5$	
$p_4 = 2,9\sqrt{\frac{g}{l}}$	$\varphi_{41} : \varphi_{42} : \varphi_{43} : \varphi_{44} = 0,4 : -0,7 : 0,5 : -0,2$	

Таким образом, полученные собственные формы колебаний неплохо описывают динамику движения гибкой нити. Поэтому такой принцип ее моделирования путем замены стержневой системой может применяться при исследовании подобного рода элементов грузоподъемных устройств. Добавляя к данной системе стержень, заменяющий кабель DT , и учитывая трал T , аналогичным образом можно получить уравнения движения всей траловой системы, и, соответственно, рассчитать необходимую мощность, подводимую на барабан ваерной лебедки.

Заключение (Conclusion)

При моделировании любого механического устройства по возможности необходима детализация при схематизации для более точного отражения исследуемого объекта. Однако это зачастую приводит к исследованию механической системы с большим числом элементов и степеней свободы. Несмотря на то, что целесообразность представления гибкого троса стержневой системой, несомненно, является существенной, тем не менее следует ограничить количество звеньев системы и при этом моделировать объект с приемлемой точностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Те А. М. Эксплуатация судовых вспомогательных механизмов, систем и устройств / А. М. Те. — Л., 2014. — 86 с.
2. Башуров Б. П. Функциональная надежность и контроль технического состояния судовых вспомогательных механизмов: учебное пособие / Б. П. Башуров, А. Н. Скиба, В. С. Чебанов. — Новороссийск: МГА имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, 2009. — 192 с.
3. Ivanovskaya A. V. Simulation of drive of mechanisms, working in specific conditions / A. V. Ivanovskaya, A. T. Rybak // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2018. — Vol. 1015. — Is. 3. — Pp. 032054. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032054.
4. Ivanovskaya A. Development of complex mathematical model of hydraulic drive, sensitive to the loading variations / A. Ivanovskaya, V. Popov, E. Bogatyreva, S. Bidenko // Vibroengineering Procedia. — 2019. — Vol. 25. — Pp. 171–176. DOI: 10.21595/vp.2019.20797.
5. Kim Y. H. The simulation of the geometry of a tuna purse seine under current and drift of purse seiner / Y. H. Kim, M. C. Park // Ocean engineering. — 2009. — Vol. 36. — Is. 14. — Pp. 1080–1088. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2009.06.011.
6. Bi C. W. Experimental investigation of the reduction in flow velocity downstream from a fishing net / C. W. Bi, Y. P. Zhao, G. H. Dong, T. J. Xu, F. K. Gui // Aquacultural engineering. — 2013. — Vol. 57. — Pp. 71–81. DOI: 10.1016/j.aquaeng.2013.08.002.
7. Бурлакова Н. Н. Проектирование палубного оборудования рыбопромысловых судов с использованием виртуальных тренажеров / Н. Н. Бурлакова, Д. Б. Бурлаков, Ю. В. Еремин // Вестник Дальневосточного государственного технического университета. — 2011. — № 1 (6). — С. 153–160.
8. Антипов В. В. Математическое обеспечение и аппаратная реализация задач управления комплексом «рыбопромысловое судно–орудия лова» / В. В. Антипов, В. Ю. Бобрович, В. К. Болховитинов, А. А. Болисов // Морской вестник. — 2011. — № 4 (40). — С. 45–49.
9. Нино В. П. Диагностика технических средств на рыбопромысловых судах в процессе их эксплуатации / В. П. Нино // Рыбное хозяйство. — 2014. — № 4. — С. 113–115.
10. Carral J. Fishing grounds' influence on trawler winch design / J. Carral, L. Carral, M. Lamas, M. J. Rodríguez // Ocean Engineering. — 2015. — Vol. 102. — Pp. 136–145. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.04.055.
11. Ханычев В. В. Информационно-аналитическое обеспечение процессов импортозамещения и локализации судового комплектующего оборудования / В. В. Ханычев, Д. О. Стоянов, Ш. Г. Петросян // Проблемы развития корабельного вооружения и судового радиоэлектронного оборудования. — 2019. — № 2 (19). — С. 10–15.
12. Ханычев В. Российский рынок судового оборудования: конъюнктура, перспективы развития и нормативно-правовое регулирование отрасли / В. Ханычев, Д. Стоянов // Морское оборудование и технологии. — 2019. — № 3 (20). — С. 12–17.

13. Ивановская А. В. Классификация эксплуатационных нагрузок на палубные грузоподъемные устройства / А. В. Ивановская // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. — 2020. — № 1. — С. 80–87.

14. Ивановская А. В. Формализация динамики механической системы «судно-ваер-трал» в переходном режиме / А. В. Ивановская // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 2 (30). — С. 106–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-106-112.

REFERENCES

1. Te, A. M. *Ekspluatatsiya sudovykh vspomogatel'nykh mekhanizmov, sistem i ustroystv*. L., 2014.
2. Bashurov, B. P., A. N. Skiba, and V.S. Chebanov. *Funktsional'naya nadezhnost' i kontrol' tekhnicheskogo sostoyaniya sudovykh vspomogatel'nykh mekhanizmov: uchebnoe posobie*. Novorossiisk: MGA imeni admirala F. F. Ushakova, 2009.
3. Ivanovskaya, A. V., and A.T. Rybak. “Simulation of drive of mechanisms, working in specific conditions.” *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1015. No. 3. IOP Publishing, 2018. 032054. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032054.
4. Ivanovskaya, Alexandra, Vladimir Popov, Elena Bogatyreva, and Sergey Bidenko. “Development of complex mathematical model of hydraulic drive, sensitive to the loading variations.” *Vibroengineering PROCEDIA* 25 (2019): 171–176. DOI: 10.21595/vp.2019.20797.
5. Kim, Yong-Hae, and Myeong-Chul Park. “The simulation of the geometry of a tuna purse seine under current and drift of purse seiner.” *Ocean engineering* 36.14 (2009): 1080–1088. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2009.06.011.
6. Bi, Chun-Wei, Yun-Peng Zhao, Guo-Hai Dong, Tiao-Jian Xu, and Fu-Kun Gui. “Experimental investigation of the reduction in flow velocity downstream from a fishing net.” *Aquacultural engineering* 57 (2013): 71–81. DOI: 10.1016/j.aquaeng.2013.08.002.
7. Burlakova, Natalya N., Dmitry B. Burlakov, and Yry V. Yeregin. “Design deck equipment of fishing vessels using the virtual simulation.” *Vestnik Dal'nevostochnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 1(6) (2011): 153–160.
8. Antipov, V. V., V. Yu. Bobrovich, V.K. Bolkhovitinov, and A. A. Bolisov. “Matematicheskoe obespechenie i apparatnaya realizatsiya zadach upravleniya kompleksom «rybopromyslovoe sudno-orudiya lova».” *Morskoi vestnik* 4(40) (2011): 45–49.
9. Nino, V.P. “Diagnostics of fishery vessels' technical facilities during exploitation.” *Rybnoe khozyaistvo* 4 (2014): 113–115.
10. Carral, Juan, Luis Carral, Miguel Lamas, and M Jesús Rodríguez. “Fishing grounds' influence on trawler winch design.” *Ocean Engineering* 102 (2015): 136–145. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.04.055.
11. Khanychev, V. V., D. O. Stoyanov, and Sh.G. Petrosyan. “Informatsionno-analiticheskoe obespechenie protsessov importozameshcheniya i lokalizatsii sudovogo komplektuyushchego oborudovaniya.” *Problemy razvitiya korabel'nogo vooruzheniya i sudovogo radioelektronnogo oborudovaniya* 2(19) (2019): 10–15.
12. Khanychev, V., and D. Stoyanov. “Rossiiskii rynek sudovogo oborudovaniya: kon'yunktura, perspektivy razvitiya i normativno-pravovoe regulirovanie otrasli.” *Morskoe oborudovanie i tekhnologii* 3(20) (2019): 12–17.
13. Ivanovskaya, Alexandra Vitalievna. “Classification of operational loads on deck lifting devices.” *Bulletin of the Kerch State Marine Technological University* 1 (2020): 80–87.
14. Ivanovskaya, A. V. “Formalization of dynamics mechanical system a “ship-dragrope-trawl” in transient condition.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(30) (2015): 106–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-106-112.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ивановская Александра Витальевна — кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет» 298309, Российская Федерация, Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 e-mail: invkerch@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivanovskaya, Aleksandra V. — PhD, associate professor Kerch State Maritime Technological University 82 Ordzhonykydze Str., Kerch, 298309, Russian Federation e-mail: invkerch@yandex.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

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

*Статья поступила в редакцию 24 сентября 2020 г.
Received: September 24, 2020.*

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-945-954

MULTI-AGENT SYSTEM FOR DISTRIBUTED ENERGY SYSTEM CONTROL

A. Yu. Kuzin, D. V. Lukichev, G. L. Demidova

ITMO University, St. Petersburg, Russian Federation

The main trend of modern energy systems is smart grids that satisfy modern requirements in the field of energy efficiency and reliability. Achieving these requirements is due to technologies such as energy storage systems, two-way electricity exchange, renewable sources, and others. These technologies are the basis of distributed power systems, which, due to redundancy, make it possible to provide energy for themselves, as well as return additional energy to the primary network. Control algorithms play an important role in this process. The control of a distributed power system using a multi-agent approach, which is an alternative to the traditional control of all processes in the system using a single central processor, is considered in the paper. The proposed approach provides interaction between all objects of the distributed system, transforming them into abstract intelligent nodes - agents with a some degree of freedom in making decisions on the energy distribution. Objects in the distributed power system can be various energy sources, including renewable resources, energy storage devices, as well as various types of devices that are loads in relation to the power grid. In this paper, algorithms for the operation of a multi-agent system are being developed. The JADE (Java Agent Development Environment) platform and the MATLAB / Simulink software package, which implements the mathematical model of the power system, are used to simulate the interaction between the agents of the distributed energy system. As part of the main task of the multi-agent system, the response to emergency events occurring in the system is modeled. It is shown that in the case when the power generated in the system is less than the required one, the loads with the lowest priorities begin to switch off sequentially until the power generated by the alternative sources exceeds the power consumed by the loads. Then, Raspberry Pi, single-board computers based on the BCM2837B0 controller with a large set of input-output ports and a number of communication interfaces are used to prototype the developed system and check algorithms.

Keywords: power supply, microgrid, smart grid, multi-agent system, real time system, JADE, MACSimJX, MATLAB/Simulink, Raspberry Pi.

For citation:

Kuzin, Aleksey Yu., Dmitry V. Lukichev, and Galina L. Demidova. "Multi-agent system for distributed energy system control." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.5 (2020): 945–954. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-945-954.

УДК 620.9, 629.3

МУЛЬТИАГЕНТНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМОЙ

А. Ю. Кузин, Д. В. Лукичев, Г. А. Демидова

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Отмечается, что основной тенденцией современной энергетики является использование интеллектуальных энергосистем, отвечающие современным требованиям в области энергоэффективности и надежности. Достижение этих требований возможно в случае использования технологий системы хранения электроэнергии, двухстороннего обмена электроэнергией, возобновляемых источников и др. Новые технологии являются основой распределенных энергосистем, которые за счет резервирования позволяют обеспечить энергией не только собственные нужды, но и отдавать излишки обратно в первичную сеть. Важное место в этом процессе занимают алгоритмы управления. Данная работа посвящена управлению распределенной энергосистемой с помощью мультиагентного подхода, являющегося

альтернативой традиционному управлению всеми процессами в системе с помощью одного центрального процессора. Предлагаемый подход обеспечивает взаимодействие между всеми объектами распределенной системы, преобразуя их в абстрактные интеллектуальные узлы-агенты, обладающие некоторой степенью свободы в принятии решений по распределению электроэнергии. Объектами в распределенной энергосистеме могут являться различные источники энергии, в том числе использующие возобновляемые ресурсы, накопители электроэнергии, а также различные виды устройств, являющихся нагрузками по отношению к энергосети. В предлагаемом исследовании разрабатываются алгоритмы работы мультиагентной системы. Для моделирования взаимодействия между агентами системы распределенной электроэнергии используются платформа JADE (Java Agent Development Environment) и программный пакет MATLAB / Simulink, в котором реализована математическая модель энергосистемы. В рамках основной задачи мультиагентной системы моделируется реакция на возникающие в ней события. Показано, что в случае, когда генерируемая в системе мощность меньше требуемой, нагрузки с наименьшими приоритетами начинают последовательно отключаться до тех пор, пока генерируемая альтернативными источниками мощность не превысит мощность, потребляемую нагрузками. В дальнейшем для прототипирования разрабатываемой системы и проверки алгоритмов используются Raspberry Pi — одноплатные компьютеры, построенные на основе контроллера BCM2837B0 с большим набором портов ввода-вывода и ряда интерфейсов для коммуникации.

Ключевые слова: электроснабжение, распределенная энергосистема, мульти-агентная система, система реального времени, JADE, MACSim.JX, MATLAB/Simulink, Raspberry Pi.

Для цитирования:

Кузин А. Ю. Мультиагентная система управления распределенной энергосистемой / А. Ю. Кузин, Д. В. Лукичев, Г. Л. Демидова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 5. — С. 945–954. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-945-954.

Введение (Introduction)

В настоящее время в области энергосистем в России наблюдается новый виток развития, обусловленный прогнозируемыми изменениями экономики не только Российской Федерации, но и мировой экономики в целом, в связи с чем потребуются ускоренный переход к более эффективной, гибкой и устойчивой энергетике. Данный переход осложняется существующими в Российской Федерации проблемами, связанными с тем, что в большинстве случаев существующее энергетическое оборудование в России и относящиеся к нему инженерные сети физически и морально устарели и требуют глубокой модернизации. Помимо этого в обновлении нуждаются также системы автоматизации управления технологическими процессами и устройствами. О необходимости изменений и направлениях развития, за счет которых возможен выход из сложившейся ситуации, отмечается в пп. 1.1 «О единой технической политике в электросетевом комплексе» «Положения ПАО «Россети»¹, а также в принятой Правительством РФ в июне 2020 года «Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года»², — документе, являющемся продолжением «Энергетической стратегии России на период до 2030 года». Данными документами декларируется приоритет применения новых технологий, в том числе систем мониторинга и диагностирования, а также создание новых алгоритмов управления.

Изменения в экономике обуславливают переход от централизованной системы электроснабжения к децентрализованной клиентно-ориентированной энергосистеме, в которой большое внимание уделяется надежности функционирования и, как следствие, бесперебойному снабжению энергией потребителей. В новой концепции сами потребители принимают активное участие в процессе перераспределения энергии, а, следовательно, на первое место выходят соответствующие алгоритмы управления, которые в том числе оптимизируют данные процессы с учетом имеющихся в энергосистеме резервных мощностей.

В последнее десятилетие во всем мире внедряются распределенные энергосети с технологией *Smart Grid* («интеллектуальная сеть» или «активно-адаптивная сеть»). *Self Monitoring*

¹ Положение ПАО «Россети». М.: ПАО «Россети», 2019. 219 с.

² Распоряжение Правительства Российской Федерации от 09.06.2020 № 1523-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/18038> (дата обращения: 13.09.2020).

Analysis and Reporting Technology — технология, позволяющая в режиме реального времени отслеживать и контролировать работу всех участников процесса выработки, передачи и потребления электроэнергии. Основной целью таких энергосетей является надежное электроснабжение потребителей с максимальным уровнем энергоэффективности и экономичности при различных изменениях в системе. Это достигается посредством скоординированного управления с помощью современных двухсторонних связей между элементами энергосистем: электростанций, источников питания, аккумуляторов и потребителей [1], [2]. Большие круизные и танкерные суда также являются современной энергосистемой, оснащенной как источниками так и приемниками электрической энергии. В связи с новыми правилами Международной морской организации (ИМО) [3], которые призваны ограничить вредные выбросы, помимо перехода на новый вид топлива (сжиженный природный газ) крупные судовые компании перестраивают энергетическую систему судна, которая требует использования новых алгоритмов управления, помогающих корректно управлять потоками мощности и минимизировать ее потери.

Основные проблемы, с которыми сталкиваются современные энергосистемы, в основном связаны с необходимостью предоставления большей мощности для создания баланса между производством и потреблением. Как отмечалось ранее, для того чтобы преодолеть эти проблемы, данные системы должны быть дополнены подсистемами распределенной генерации энергии и использовать новейшие технологий. В настоящее время к эффективным распределенным вычислительным интеллектуальным методам относится подход с использованием мультиагентных систем (МАС), представляющий собой способ автоматизированного управления на основе концепции интеллектуальных агентов. В целом агент представляет собой независимую вычислительную единицу, принимающую воздействие от внешнего мира и обрабатывающую его в соответствии с заложенным в ней алгоритмом с последующей выдачей ответной реакции в виде управляющего сигнала [4]–[6]. Зачастую при проектировании агентов используют такие технологии искусственного интеллекта, как нечеткая логика, нейронные сети, генетические алгоритмы и др. (рис. 1, а). К агентам предъявляются следующие требования:

- независимая, автономная и безоператорная работа;
- возможность общения с другими агентами;
- наличие собственной цели и формы поведения;
- возможность реагировать на изменения в среде.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Взаимодействие агента и области (среды), в которой он работает, показано на рис. 1, б. Каждый агент имеет четыре компонента: интерфейсы ввода и вывода, программу принятия решений и интерфейс связи. Также используются датчики в зависимости от области применения и исполнительные механизмы (двигатели, реле).



Рис. 1. Области знания и технологии, используемые интеллектуальными агентами (а), схема функционирования агента (б)

Мультиагентная система (МАС) — это группа агентов, функционирующих и взаимодействующих для достижения общих целей. На рис. 2 показана общая концепция МАС, когда каждый агент, имеющий свой объект управления и физический контроллер, оснащен соответствующими инструментами, такими как датчики и исполнительные устройства (различные приводы, контакторы и др.) для получения локальных данных и предоставления управляющих сигналов для контролируемого оборудования соответственно. Чаще всего агенты взаимодействуют друг с другом путем обмена сообщениями для достижения определенных целей.



Рис. 2. Структура мультиагентной системы

МАС обладают *надежностью*, которая достигается за счет использования нескольких агентов и алгоритмов их совместного управления, поэтому система сохраняет работоспособность при сбое одного или нескольких агентов. Еще одним преимуществом МАС является *масштабируемость*, которая проявляется в том, что можно легко изменить структуру системы, добавив к ней дополнительных агентов. Применительно к энергетике важнейшим направлением при синтезе МАС является разработка таких алгоритмов работы распределенных энергосистем, в процессе реализации которых агенты должны управлять потоками энергии между устройствами распределенной генерации, потребления и накопления энергии, в том числе в аварийном и предаварийных состояниях, анализировать работу и обнаруживать неисправности, а также использовать технологию блокчейна для энергосистем [7]–[9].

Предлагаемое исследование посвящено созданию МАС для распределенной интеллектуальной энергосети, а также проверке алгоритмов ее работы при возникновении аварийного режима, возникающего в системе.

Все агенты используют программную среду. Выбор правильной платформы — нетривиальная задача, которая обычно связана с методологией проекта. Для коммуникации между агентами наиболее часто используется *Java Agent Development (JADE)*, представляющее собой программное обеспечение для распределенных мультиагентных приложений на основе архитектуры одноранговой связи. Данная программная среда создана на основе *Java* с открытым исходным кодом, который соответствует протоколу *IEEE FIPA* [10]. После запуска каждый агент должен передать информацию о себе, чтобы зарегистрироваться в системе. В дальнейшем программная среда будет контролировать работу всей системы и при необходимости производить необходимые управляющие действия для отдельных агентов. При работе агенты обмениваются информацией, включающей запрос, передачу данных и т. д.

Для построения модели распределенной энергосистемы в работе использовался пакет *MATLAB / Simulink*. Программа *MACSimJX* применялась для коммуникации модели энергосистемы *MATLAB/Simulink* со средой *Jade* (рис. 3) [12]. Инструментарий *MACSimJX* имеет архитектуру клиент-сервер и позволяет выполнять параллельную обработку данных, а также обработку многопоточных программ, что является обязательным требованием для распределенных систем.

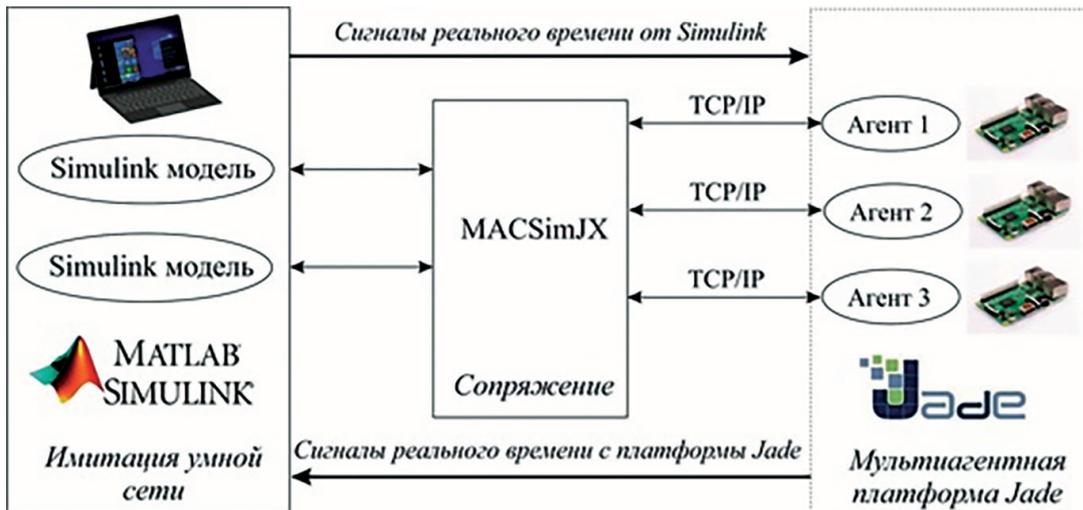


Рис. 3. Структурная схема взаимодействия агентов при моделировании распределенной системы электроснабжения с использованием программных сред JADE и MATLAB

Модель исследуемой распределенной энергосистемы с мультиагентной системой управления, реализованная в пакете MATLAB / Simulink, представлена на рис. 4 и включает следующие основные блоки:

- основной источник энергии — электростанцию;
- ветрогенераторную установку;
- аккумуляторную систему накопления энергии;
- критическую нагрузку, подключенную непосредственно к электростанции;
- вторичные нагрузки, подключенные к изолированной сети.

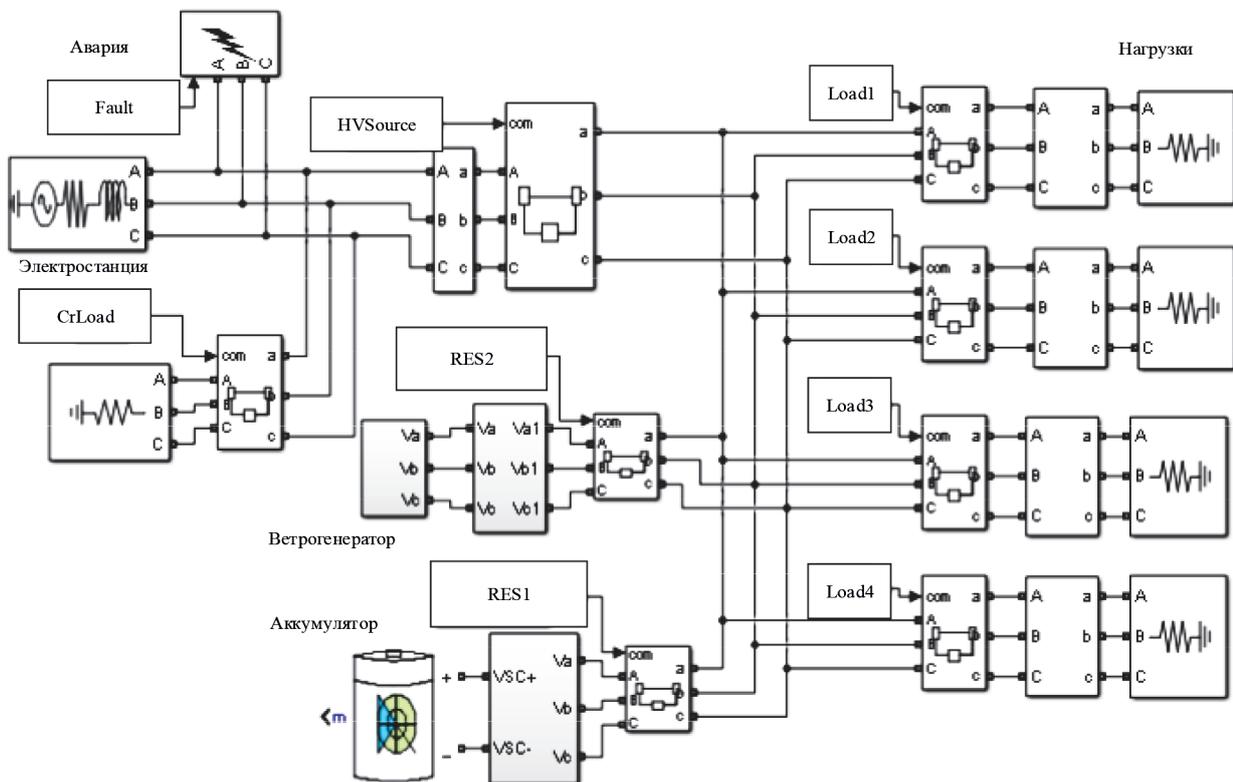


Рис. 4. Модель распределенной интеллектуальной энергосистемы в программе расширении Simulink

Модель включает в себя шину трехфазного напряжения от источника (электростанции): 380/220. Аккумуляторная батарея и ветрогенератор оснащены собственными трехфазными преобразователями напряжения. К высоковольтной шине подключена основная нагрузка, а также в модель этой сети добавлен блок *Fault* для генерации аварийной ситуации. К трехфазной сети подключены четыре трехфазных нагрузки одинаковой мощности. Все потребители и генераторы подключены к сети через размыкатели, управляемые агентами. Разработанная MAC содержит следующие агенты:

- *агент нагрузки*: установлен на каждой из нагрузок, отвечает за количество потребляемой энергии и передает сообщения о запросе энергии;
- *агент источника энергии*: установлен на каждом источнике энергии и отвечает за мощность, которую способен отдать источник, а также за мониторинг штатной работы источника энергии;
- *агент основного регулятора*: обеспечивает контроль за потоками энергии в системе и мониторинг внештатных ситуаций.

В таблице показаны элементы модели и управляющие ими сигналы, которые генерируются соответствующими агентами в результате алгоритма работы MAC.

Сигналы управления элементами распределенной энергосистемы

№ п/п.	Элемент	Управляющий сигнал	№ п/п.	Элемент	Управляющий сигнал
1	Основной источник	HVSource	5	Нагрузка 1	Load1
2	Основная нагрузка	CrLoad	6	Нагрузка 2	Load2
3	Ветрогенератор	RES1	7	Нагрузка 3	Load3
4	Аккумуляторная батарея	RES2	8	Нагрузка 4	Load4

Режим работы мультиагентной системы описывается блок-схемой, представленной на рис. 5. Данный алгоритм был реализован на языке *Java* в среде *JADE*. В работе MAC рассматриваемой распределенной энергосистемы участвуют два агента источников энергии, четыре агента нагрузки и один агент основного регулятора.

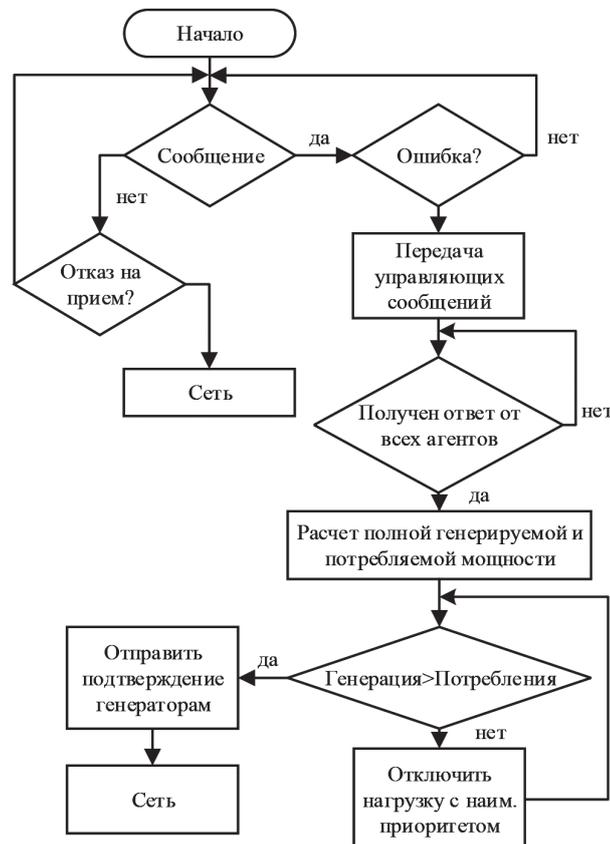


Рис. 5. Блок-схема алгоритма работы мультиагентной системы

При работе энергосистемы в штатном режиме от центральной электростанции возможна ситуация, когда на линии электропередачи произойдет авария. В таком случае необходимо подключить альтернативные источники энергии. В предложенной модели такими источниками выступают аккумуляторная батарея и ветрогенераторная установка, подключенные к общей шине питания энергосистемы с помощью частотных преобразователей. В момент аварии на главный управляющий агент в системе приходит сообщение об аварии от агента, отвечающего за электростанцию. Главный агент запрашивает информацию у агентов альтернативных источников о готовности, а затем информацию о доступной мощности. Он рассчитывает необходимую мощность, исходя из информации, предоставляемой агентами нагрузок. В случае, если генерируемая мощность меньше требуемой, то нагрузки с наименьшими приоритетами начинают последовательно отключаться до тех пор, пока генерируемая альтернативными источниками мощность не превысит потребляемую нагрузками.

Процессы включения / отключения нагрузок в описанном ранее режиме представлены на рис. 6. По осям ординат отложены U_{load} — линейные напряжения на рассматриваемых нагрузках. Таким образом, в результате обмена сообщениями и анализа доступной мощности были отключены наименее важные нагрузки, а после устранения аварии вновь подключены.

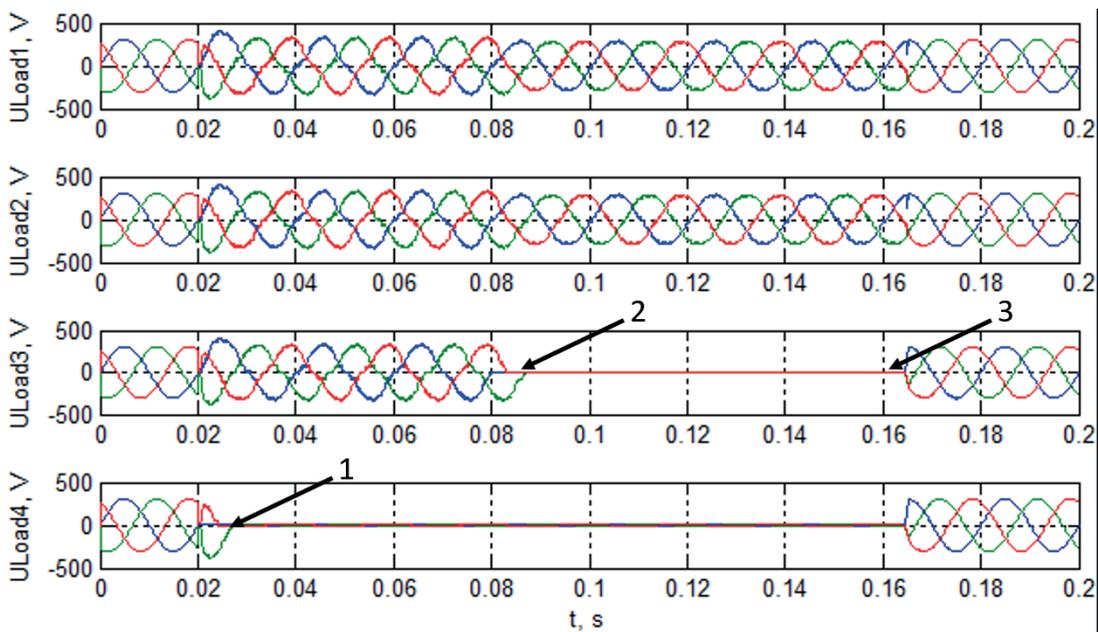


Рис. 6. Диаграммы напряжений на нагрузках при моделировании аварийной ситуации:

- 1 — аварийное отключение основного источника (электростанция);
- 2 — отключение одного из дополнительных источников (ветрогенератор);
- 3 — восстановление основного источника

Программный пакет *Java Agent Development Environment* позволяет, используя *Java*-библиотеки, программировать агенты для различных объектов и различной сложности. При этом за счет универсальности языка *Java* его можно применять на различных платформах с различными операционными системами.

Для проверки результатов моделирования проводилось прототипирование мультиагентной системы с использованием платформы *Raspberry Pi*-одноплатных компьютеров на основе контроллера *BCM2837B0* с большим набором портов ввода-вывода и ряда интерфейсов для коммуникации [12]. Модели агентов выполнялись на платформе *Raspberry Pi* в виде отдельных приложений. Данные агенты уже в виде физических моделей взаимодействовали между собой и с компьютером, используя протокол *TCP/IP*. Результаты работы мультиагентной системы, реализованной с помощью платформы *Raspberry Pi*, полностью повторяют результаты моделирования *MAC* при аварийных

режимах работы энергосистемы (см. рис. 6). Следующим шагом исследования будет являться создание и управление физическим прототипом распределенной интеллектуальной энергосистемы, включающей блоки, аналогичные блокам в математической модели: трехфазный источник, ветрогенератор, солнечная панель, накопитель и потребители.

Обсуждение (Discussion)

Представленное решение в области управления распределенной энергосистемой позволяет автоматизировать процессы принятия решений, например, для решения таких проблем, как перегрузка, отключение питания, баланс мощности и сбой отдельных узлов. При этом за счет того, что мультиагентные системы состоят из нескольких агентов, они могут применяться для оптимизации различных показателей распределенных энергосистем, таких как пиковое потребление, стоимость электроэнергии и др. Кроме того, таким образом обеспечивается наиболее легкое дополнение существующей энергосистемы дополнительными источниками электроэнергии без дополнительных затрат на существенное изменение системы управления. При реализации распределенной энергосистемы с мультиагентным управлением использовалось межплатформенное взаимодействие посредством программ *MATLAB / Simulink*, *MACSimJX*, *JADE*. В дальнейших исследованиях предполагается перенести разработанную МАС на физический прототип распределенной энергосистемы, которая в данный момент создается в Университете ИТМО.

Выводы (Conclusions)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В работе была продемонстрирована эффективность применения мультиагентного подхода в распределенной энергосистеме для управления ее работой и обеспечения гибкой защиты ее объектов.
2. Распределенная энергосистема была реализована и смоделирована с использованием *MATLAB / Simulink*. Мультиагентная система была разработана с использованием инструментария создания мультиагентных приложений с открытым исходным кодом «*Java Agent Development*» (*JADE*), в том числе на аппаратном уровне с помощью платформы *Raspberry Pi*. Взаимодействие *MATLAB / Simulink* и *JADE* было организовано с помощью специализированного приложения *MACSimJX*.
3. В системе электроснабжения интеллектуальные сети используются главным образом для перераспределения энергии в случае аварий на главном источнике (отключение источника или обрыв фазы). В этом случае дополнительные источники, подключенные к сети, должны восполнить недостаток мощности. В мультиагентных системах логика такого переключения определяется взаимодействием агентов. В соответствии с этим были разработаны сценарии работы агентов.
4. Результаты моделирования, в том числе с использованием физического аналога агента на платформе *Raspberry Pi*, показали, что алгоритмы МАС изолировали основной источник питания при возникновении неисправности, задействовали резервный источник и таким образом, защитили потребителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бердников П. Н. Основные положения концепции интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью / П. Н. Бердников, Ю. А. Дементьев, Ю. И. Моржин, Ю. Г. Шакарян // Энергия Единой сети. — 2012. — № 4 (4). — С. 4–11.
2. Moharm K. State of the art in big data applications in microgrid: a review / K. Moharm // *Advanced Engineering Informatics*. — 2019. — Vol. 42. — Pp. 100945. DOI: 10.1016/j.aei.2019.100945.
3. Международная морская организация (ИМО) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.imo.org> (дата обращения: 13.09.2020).

4. Глуценко П. В. Активно-адаптивные электросети: интеллектуальный мультиагентный диагностико-прогнозирующий комплекс и интеллектуальный алгоритм мультиагента решений диагностического мониторинга / П. В. Глуценко // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. — 2014. — № 8 (68). — С. 1.
5. Malik F. H. A review: Agents in smart grids / F. H. Malik, M. Lehtonen // *Electric Power Systems Research*. — 2016. — Vol. 131. — Pp. 71–79. DOI: 10.1016/j.epsr.2015.10.004.
6. Stone P. Multiagent systems: A survey from a machine learning perspective / P. Stone, M. Veloso // *Autonomous Robots*. — 2000. — Vol. 8. — Is. 3. — Pp. 345–383. DOI: 10.1023/A:1008942012299.
7. Roche R. Multi-agent systems for grid energy management: A short review / R. Robin, B. Blunier, A. Miraoui, V. Hilaire, A. Koukam // *IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. — IEEE, 2010. — Pp. 3341–3346. DOI: 10.1109/IECON.2010.5675295.
8. Kiran P. Multi-agent based systems on micro grid — a review / P. Kiran, K. R. M. V. Chandrakala, T. N. P. Nambiar // *2017 international conference on intelligent computing and control (I2C2)*. — IEEE, 2017. — Pp. 1–6. DOI: 10.1109/I2C2.2017.8321880.
9. Morstyn T. Control strategies for microgrids with distributed energy storage systems: An overview / T. Morstyn, B. Hredzak, V. G. Agelidis // *IEEE Transactions on Smart Grid*. — 2016. — Vol. 9. — Is. 4. — Pp. 3652–3666. DOI: 10.1109/TSG.2016.2637958.
10. Poggi A. Extending JADE for agent grid applications / A. Poggi, M. Tomaiuolo, P. Turci // *13th IEEE International Workshops on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises*. — IEEE, 2004. — Pp. 352–357. DOI: 10.1109/ENABL.2004.30.
11. Bellifemine F. L. Developing multi-agent systems with JADE / F. L. Bellifemine, G. Caire, D. Greenwood. — John Wiley & Sons, 2007. — Vol. 7. — 300 p.
12. Upton E. Raspberry Pi User Guide / E. Upton, G. Halfacree. — 4th Edition. — Chichester: Wiley, 2016. — 320 p.

REFERENCES

1. Berdnikov, R.N., Yu.A. Dement'ev, Yu.I. Morzhin, and Yu.G. Shakaryan. "Osnovnye polozheniya kontseptsii intellektual'noi elektroenergeticheskoi sistemy Rossii s aktivno-adaptivnoi set'yu." *Energiya Edinoi seti* 4(4) (2012): 4–11.
2. Moharm, Karim. "State of the art in big data applications in microgrid: a review." *Advanced Engineering Informatics* 42 (2019): 100945. DOI: 10.1016/j.aei.2019.100945.
3. International Maritime Organization (IMO). Web. 13 Sept. 2020 <<http://www.imo.org>>.
4. Glushchenko, Pavel Vital'evich. "Actively adaptive grid: intelligent multi-agent diagnostic and predictive complex and intelligent algorithm of multiagent solutions diagnostic monitoring." *Management of economic systems: scientific electronic journal* 8(68) (2014): 1.
5. Malik, Farhan H., and Matti Lehtonen. "A review: Agents in smart grids." *Electric Power Systems Research* 131 (2016): 71–79. DOI: 10.1016/j.epsr.2015.10.004.
6. Stone, Peter, and Manuela Veloso. "Multiagent systems: A survey from a machine learning perspective." *Autonomous Robots* 8.3 (2000): 345–383. DOI: 10.1023/A:1008942012299.
7. Roche, Robin, Benjamin Blunier, Abdellatif Miraoui, Vincent Hilaire, and Abder Koukam. "Multi-agent systems for grid energy management: A short review." *IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, 2010. 3341–3346. DOI: 10.1109/IECON.2010.5675295.
8. Kiran, P., KRM Vijaya Chandrakala, and T.N.P. Nambiar. "Multi-agent based systems on micro grid — a review." *2017 international conference on intelligent computing and control (I2C2)*. IEEE, 2017. 1–6. DOI: 10.1109/I2C2.2017.8321880.
9. Morstyn, Thomas, Branislav Hredzak, and Vassilios G. Agelidis. "Control strategies for microgrids with distributed energy storage systems: An overview." *IEEE Transactions on Smart Grid* 9.4 (2016): 3652–3666. DOI: 10.1109/TSG.2016.2637958.
10. Poggi, Agostino, Michele Tomaiuolo, and Paola Turci. "Extending JADE for agent grid applications." *13th IEEE International Workshops on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises*. IEEE, 2004. 352–357. DOI: 10.1109/ENABL.2004.30.
11. Bellifemine, Fabio Luigi, Giovanni Caire, and Dominic Greenwood. *Developing multi-agent systems with JADE*. Vol. 7. John Wiley & Sons, 2007.
12. Upton, Eben, and Gareth Halfacree. *Raspberry Pi User Guide*. 4th Edition. Chichester: Wiley, 2016.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузин Алексей Юрьевич — аспирант

Научный руководитель:

Лукичев Дмитрий Вячеславович

Университет ИТМО

197101, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

Кронверкский пр., д. 49, литер А

e-mail: cuzinaleksey@yandex.ru

Лукичев Дмитрий Вячеславович —

кандидат технических наук, доцент

Университет ИТМО

197101, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

Кронверкский пр., д. 49, литер А

e-mail: lukichev@itmo.ru

Демидова Галина Львовна —

кандидат технических наук, доцент

Университет ИТМО

197101, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

Кронверкский пр., д. 49, литер А

e-mail: demidofffa@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuzin, Aleksey Yu. — Postgraduate

Supervisor:

Lukichev, Dmitry V.

ITMO University

49A Kronverkskiy Av., St. Petersburg, 197101,

Russian Federation

e-mail: cuzinaleksey@yandex.ru

Lukichev, Dmitry V. —

PhD, associate professor

ITMO University

49A Kronverkskiy Av., St. Petersburg, 197101,

Russian Federation

e-mail: lukichev@itmo.ru

Demidova, Galina L. —

PhD, associate professor

ITMO University

49A Kronverkskiy Av., St. Petersburg, 197101,

Russian Federation

e-mail: demidofffa@mail.ru

Статья поступила в редакцию 29 сентября 2020 г.

Received: September 29, 2020.

ЭКСПЕДИЦИЯ ПО БАЛТИЙСКОМУ И СЕВЕРНОМУ МОРЯМ

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-955-969

HYDROMETEOROLOGICAL OBSERVATIONS IN THE BALTIC AND NORTH SEAS DURING THE VOYAGE OF THE SAILING TRAINING VESSEL «MIR» (APRIL–JULY OF 2019)

E. S. Smirnova, A. O. Semidelova, A. V. Lusina

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

The unique practice of the 2nd year students of the Arctic Faculty named of “Floating University”, where a research expedition was conducted as part of the Sailing Training Vessel “Mir” is considered in the paper. During the voyage, accompanying hydrometeorological observations were made in the Baltic and North Seas. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping has never organized such an expedition before. And in this area, such a project is also implemented for the first time. The research aims were to gain practical experience in the real conditions, to collect full hydrometeorological information along the ship route and analyze it, and to compile an essay. The systematic organization of hydrometeorological tracking of the voyage was highlighted among the tasks. The text contains data from daily regular measurements of atmospheric pressure, air temperature, and wind speed. Further, the characteristic trends of these phenomena are analyzed, the results are compared with the climatic conditions and existing characteristics of the navigation areas. Wind directions and wave conditions are also described. Unique charts are made according to the “wind rose” type, relative to certain segments of the route. Data on prevailing cloud cover and weather during the voyage are also considered. Some instrument observations are compared with the Beaufort scale. According to the results of observations, we can sum up that local hydrometeorological trends do not always correspond to the atmospheric trends observed over large areas. The discrepancies are often very significant. It is caused by local geography, coastal landforms, currents, local winds, and other factors. All these facts once again proves the need for regular sea surveys for Hydrometeorology and the need for constant ship observations, especially in the dangerous areas of navigation. In this regard, it is important to obtain such practical skills of students.

Keywords: “Floating University”, student practice, hydrometeorological navigation support, atmospheric pressure, wind speed and direction, air temperature, cloud cover, weather, wave characteristics.

For citation:

Smirnova, Ekaterina S., Alina O. Semidelova, and Anastasiy V. Lusina. “Hydrometeorological observations in the Baltic and North Seas during the voyage of the Sailing Training Vessel «Mir» (April–July of 2019).” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.5 (2020): 955–969. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-955-969.

УДК 656.052.5

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ В БАЛТИЙСКОМ И СЕВЕРНОМ МОРЯХ ВО ВРЕМЯ РЕЙСА УПС «МИР» (апрель–июль 2019 г.)

Е. С. Смирнова, А. О. Семиделова, А. В. Лузина

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

В работе рассматривается уникальная практика студентов арктического факультета 2-го курса — «Плавучий университет», в рамках которой была проведена научно-исследовательская экспедиция в составе учебного парусного судна «Мир». Отмечается, что во время рейса были проведены сопутствующие гидрометеорологические наблюдения в Балтийском и Северном морях. Государственным университетом морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова ранее подобная экспедиция

не организовывалась. В данном районе такой проект также реализован впервые. В цели исследования входило получение практического опыта в реальных условиях, сбор полноценной гидрометеорологической информации по маршруту судна и ее анализ, составление очерка. Среди поставленных задач была выделена систематическая организация гидрометеорологического сопровождения рейса. Рассмотрены данные ежедневных регулярных измерений атмосферного давления, температуры воздуха и скорости ветра. Проанализированы характерные тенденции данных явлений, результаты сопоставлены с климатическими условиями и существующими характеристиками районов плавания. Указаны направления ветра и волновые условия. Составлены уникальные графики по типу «розы ветров» относительно определенных отрезков маршрута. Рассмотрены данные по преобладающим видам облачности и погоде во время рейса. Некоторые приборные наблюдения сопоставлены со шкалой Бофорта. На основе результатов наблюдений можно сделать вывод о том, что существующие местные гидрометеорологические тенденции не всегда соответствуют атмосферным тенденциям, наблюдаемым на больших площадях, и расхождения при этом зачастую очень значительны. Причинами этого являются местная география, формы берегового рельефа, течения, местные ветры и другие факторы. Все это еще раз доказывает необходимость регулярного обследования морей на гидрометеорологию и постоянного судового ведения наблюдений, особенно в опасных районах плавания, в связи с чем отмечается особая важность получения подобных практических навыков студентами.

Ключевые слова: «Плавающий университет», практика студента, гидрометеорологическое сопровождение мореплавания, атмосферное давление, скорость и направление ветра, температура воздуха, облачность, погода, характеристики волн.

Для цитирования:

Смирнова Е. С. Гидрометеорологические наблюдения в Балтийском и Северном морях во время рейса УПС «Мир» (апрель–июль 2019 г.) / Е. С. Смирнова, А. О. Семиделова, А. В. Лузина // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 5. — С. 955–969. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-955-969.

Введение (Introduction)

С 24 апреля по 8 июля 2019 г. студентами 2-го курса Арктического факультета в рамках практики «Плавающий университет» была предпринята научно-исследовательская экспедиция в составе учебного парусного судна (УПС) «Мир». «Плавающие университеты» — уникальное явление в России, в котором объединены учебная и исследовательская составляющие. Подобные университеты открыты в САФУ (Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова), Северо-Восточном федеральном университете, РГГМУ (Российский государственный гидрометеорологический университет). Теперь к реализации данного формата обучения приступили в ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. Маршрут судна во время экспедиции пролегал через Балтийское и Северное моря, и главная идея научно-исследовательской программы состояла в гидрометеорологическом сопровождении рейса. Следует отметить, что подобных проектов в этих районах плавания ранее не проводилось. В настоящее время, когда больших парусников осталось достаточно мало, в проведении подобных экспедиций, казалось бы, нет особой необходимости. Однако и яхты, и парусники большую часть времени передвигаются благодаря парусам, которые приводятся в движение ветром, и в этом случае рулевым необходимо знать изменение направления и силы ветра.

Основной причиной возникновения ветра является неравномерное распределение атмосферного давления, которое вызывает такие явления, как циклоны или антициклоны. Данные о них можно получить по прогнозам, передаваемым по системе радиосвязи и публикуемым на метеосайтах. Полученная информация, таким образом, недостаточно точная, так как охватывает большие участки Земли и снимается на больших высотах. Приближение циклонов и антициклонов можно определить по барической тенденции, изменению ветра, дальности видимости и облачности с характерной погодой и осадками. Таким образом, гидрометеорологические наблюдения являются важной частью работы штурманов парусных судов, не способных управляться в штиль, трудноуправляемых в шторм и сильно зависящих от силы ветра. Однако и на обычных судах, передвигающихся при помощи двигателя, необходимо также проводить гидрометеорологические наблюдения. Естественно, что для этого существуют многочисленные гидрометеорологические описания различных районов плавания с основными характерными признаками и встречающимися явлениями. Моряки веками составляли подробные описания сопутствующих условий, но эти сведения требуют регулярного обновления, чего в настоящее время фактически не делается.

Существующую навигационную информацию необходимо постоянно пополнять в связи с наблюдающимися климатическими изменениями, тектоническими движениями и, к сожалению, загрязнением окружающей среды, что тоже оказывает влияние на изменение условия плавания судов. При этом часть информации можно получить только непосредственно с борта судна (например, обледенение). Вместе с тем погодные условия зависят от многих различных факторов. Поэтому, несмотря на современные технические возможности, спутниковое оборудование и оповещение ближайших гидрометеорологических станций, полученная дистанционно информация может представлять собой недостаточно точное описание гидрометеорологической обстановки района. Кроме того, подобные наблюдения необходимы для проведения различного рода гидрографических, изыскательских, океанологических и других видов работ.

Актуальность проблемы обусловлена получением практических навыков студентами в реальных условиях плавания на УПС «Мир», а также гидрометеорологическим сопровождением рейса парусника для обеспечения безопасности плавания в Балтийском и Северном морях в период рейса. При этом вторая задача является жизненно необходимой, так как парусное судно зависит от погодных условий, к тому же гидрометеорологические характеристики требуют постоянного обновления в связи с регулярными природными и климатическими изменениями.

Цели проведения данного исследования:

1. Гидрометеорологическое сопровождение рейса УПС «Мир».
2. Приобретение практических навыков.
3. Изучение гидрометеорологических условий плавания в Балтийском и Северном морях в период с мая по июль.
4. Составление гидрометеорологического очерка.

Задачи исследования:

1. Постоянное установление времени, места и состояния движения судна.
2. Проведение наблюдений в установленные сроки: 0, 3, 6, 12, 15, 18, 21 24(0) UTC.
3. В каждый из установленных сроков необходимо выполнять следующие гидрометеорологические наблюдения: визуально над облачностью и состоянием неба, над осадками, туманами, атмосферными и другими погодными явлениями: видимостью, волнением, ветром — с помощью анемометра и по шкале Бофорта; температурой воздуха с помощью судовых термометров; атмосферным давлением с помощью барометра-анероида и барографа.
4. Записывать показания в книжки для судовых наблюдений.
5. Выполнять анализ карт погоды и синоптической информации.
6. Проводить анализ суточного хода метеорологических параметров.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Все работы и наблюдения проводились в соответствии с рекомендациями, изложенными в «Наставлении гидрометеорологическим станциям и постам» [1], [2], а также в «Техническом регламенте ВМО № 49» [3] и в «Коде КН-01» [4]. Наблюдения выполнялись визуальными и инструментальными способами с помощью барометра-анероида, барографа, термометров, ветрочета, анемометра, а также судовой метеостанции, GPS-приемника и факсимильного приемника карт погоды (FX-330).

Перечень обязательных методических пособий для судов по метеорологии включает, в том числе «Международный атлас облаков» [5]. Для получения внешней навигационной информации использовались системы ECDIS и NAVTEX. На основе полученных данных наблюдений и последующего анализа этих материалов были выполнены обобщения по районам плавания [6]–[8].

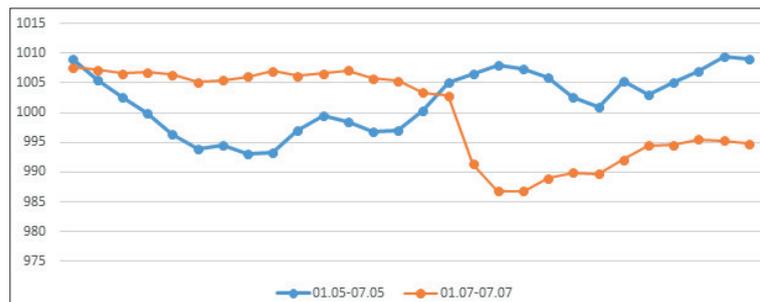
Результаты и обсуждение (Results & Discussion)

Тенденции барического и температурного режимов и скорости ветра. Маршрут УПС «Мир» проходил через Балтийское море, проливы Большой Бельт, Каттегат и Скагеррак, а также через Северное море. Поскольку обратный путь пролегал почти по тому же маршруту, по снятым

метеорологическим наблюдениям в разные месяцы в указанных морях и проливах можно увидеть тенденцию изменения погодных условий в этих акваториях в зависимости от месяца года. Судно проходило Балтийское море в мае (постоянные измерения выполнялись 1–4 мая) и в июле (наблюдения выполнялись 1–7 июля).

Среднее давление в мае за указанный период составило 998,3 ГПа, амплитуда его изменения — 993–1009 ГПа (рис. 1, а). Средняя температура за май составила 8,3 °С с колебаниями в пределах от 5 °С до 11 °С (рис. 1, б). Средняя скорость ветра — 12,6 м/с, амплитуда изменений — от 4 м/с до 21 м/с (рис. 1, в). Также в указанный период наблюдений за май 2019 г. над акваторией Балтийского моря наблюдался циклон, который полностью сформировался к 3 мая.

а)



б)



в)



Рис. 1. Графики изменения данных гидрометеорологических измерений за май–июль 2019 г. в Балтийском море:
а — давления; б — температуры; в — скорости ветра

Среднее давление 1–7 июля равно 999,3 ГПа, а амплитуда его колебаний составила 986,8–1007,1 (см. рис. 1, а). Средняя температура за июль — 17,0 °С, ее колебания в пределах 7,1–25,3 °С (см. рис. 1, б). Средняя скорость ветра — 8,3 м/с, амплитуда изменений — 1–18 м/с (см. рис. 1, в). Кроме того, 5–7 июля над Балтикой наблюдался циклон.

На основании ранее изложенного было установлено:

1. Среднее давление за июль выше среднего давления за май на 1 ГПа и значение амплитуды колебаний давления за июль больше, чем за май.

2. Средняя температура за июль выше средней температуры за май на $8,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, амплитуда изменения температуры за июль также больше, чем за май.

3. Средняя скорость ветра за июль меньше средней скорости ветра за май на $4,3\text{ м/с}$, при этом амплитуды изменения скорости ветра за май и за июль равны.

4. Циклоны наблюдались в мае и июле.

Наиболее существенное влияние на погоду в Балтийском море оказывает Исландский минимум, Сибирский и Азорский максимумы. Характером их взаимодействия определяются сезонные особенности погоды. Весной и летом над Балтикой господствует пониженное давление и Азорский максимум, который иногда дополняется Полярным. Циклоны уже не имеют такой силы, как в зимний период. Ветры не такие сильные и имеют разные направления. Весной из-за этого наблюдается неустойчивая погода, а в период, когда дуют северные ветры, они быстро приносят в регион холода. Западные и северо-западные ветры летом формируют неустойчивую, влажную и прохладную погоду. Чаще средняя температура июля не превышает $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тем не менее в Балтийском регионе бывает жарко — воздушные массы средиземноморья приносят сухую и очень теплую погоду, но крайне редко.

Проливы Большой Бельт, Каттегат и Скагеррак судно пересекало в мае 2019 г. и наиболее стабильные наблюдения проводились 4–7 мая и в июне гидрометеорологические явления фиксировались 26–28 июня. Среднее давление в мае за указанный период составило $1004,8\text{ ГПа}$, амплитуда его изменения $1000,4\text{--}1008\text{ ГПа}$ (рис. 2, а). Средняя температура за май составила $9,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, ее колебания в пределах $6,8\text{--}15,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 2, б). Средняя скорость ветра — $10,75\text{ м/с}$, амплитуда изменений от 4 м/с до 16 м/с (рис. 4, в). 4 мая наблюдался небольшой зарождающийся циклон над проливами, но 5 мая он уже полностью исчез.

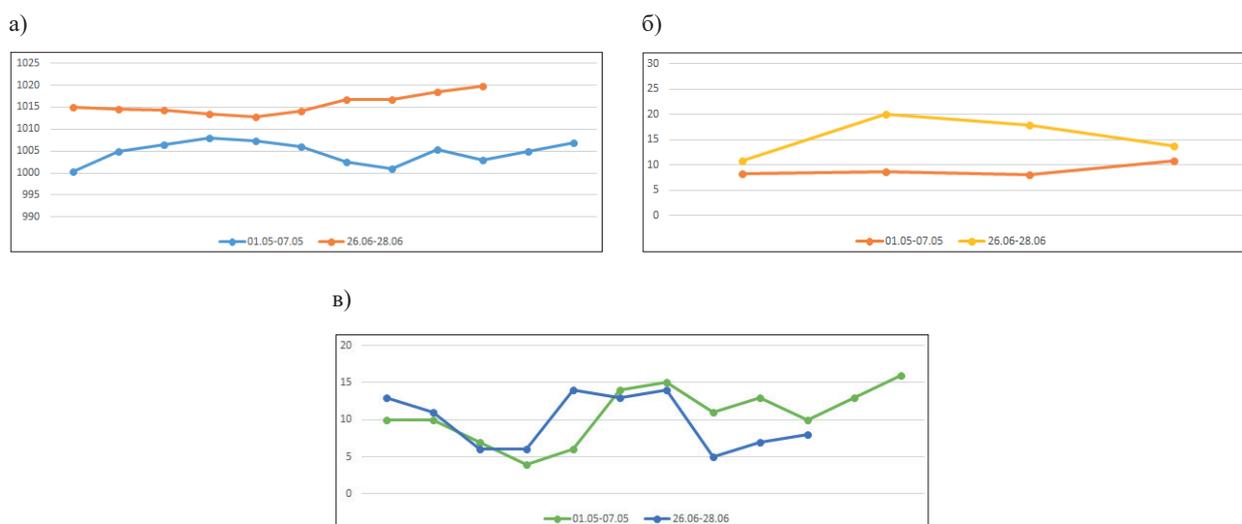


Рис. 2. Графики изменения данных гидрометеорологических измерений за май–июнь 2019 г. в проливах Большой Бельт, Каттегат и Скагеррак: а — давления; б — температуры; в — изменения скорости ветра

Среднее давление в июне равно $1015,7\text{ ГПа}$, а амплитуда его колебаний составила $1012,9\text{--}1019,7$ (см. рис. 2, а). Средняя температура за июнь — $19,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура колеблется в пределах $12,2\text{--}25,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 2, б). Средняя скорость ветра — $9,3\text{ м/с}$, амплитуда изменений — $5\text{--}14\text{ м/с}$ (см. рис. 2, в). При этом 26–28 июня циклонов в районе проливов не наблюдалось.

На основании ранее изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Среднее давление за июнь выше среднего давления за май на $10,9\text{ ГПа}$, но амплитуда колебаний давления за июнь меньше, чем за май.

2. Средняя температура за июнь выше средней температуры за май на $9,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, амплитуда изменения температуры за июнь также больше, чем за май.

3. Средняя скорость ветра за июнь меньше средней скорости ветра за май на 1,45 м/с, при этом амплитуды изменения скорости ветра за май также больше, чем за июнь.

4. Если циклоны и появлялись в указанные месяцы, то были довольно слабы и быстро заполнялись.

Маршрут УПС «Мир» проходил через Северное море, где наблюдения выполнялись 7–31 мая, и 1–25 июня.

Среднее давление в мае за указанный период составило 1008,41 ГПа, амплитуда его изменения — 990–1021 ГПа (рис. 3, а). Средняя температура за май — 13,8 °С, ее изменение фиксировалось в пределах 7,9–19,6 °С (рис. 3, б). Средняя скорость ветра — 8,7 м/с, амплитуда изменений 1–17 м/с (рис. 3, в). 9 мая наблюдался циклон над Северным морем, также наблюдались еще два циклона, расположенных западнее.

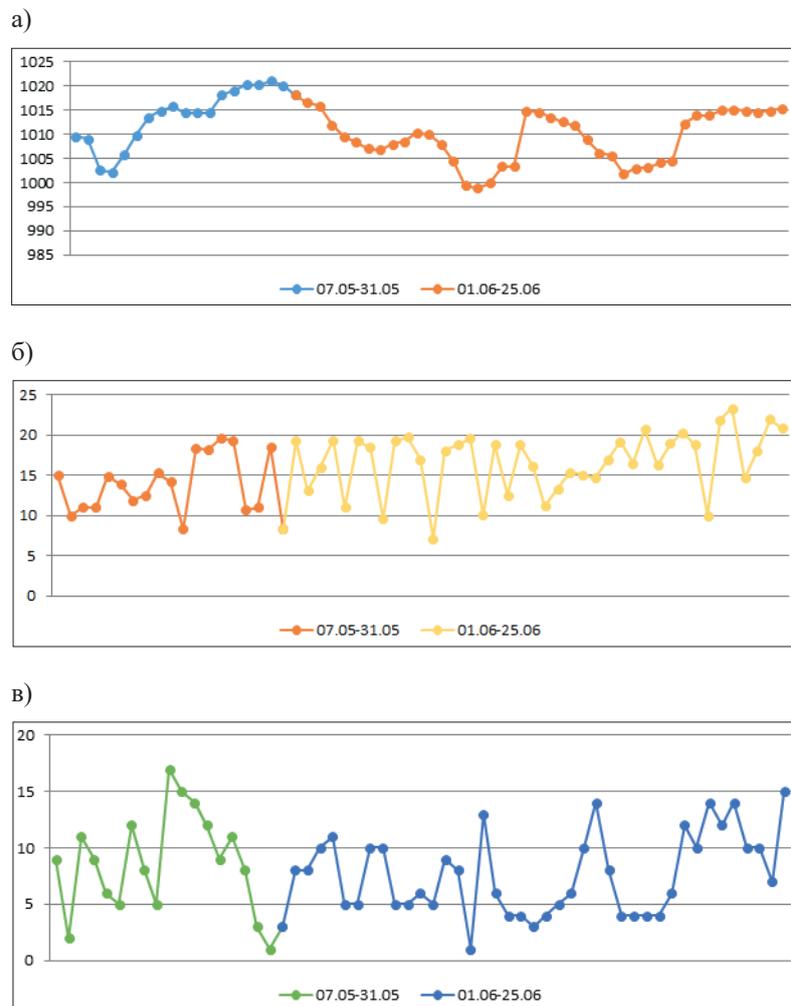


Рис. 3. График изменения данных гидрометеорологических измерений в Северном море за май–июнь 2019 г.: а — давления; б — температуры; в — скорости ветра

Среднее давление в июне составляет 1009,2 ГПа, а амплитуда его колебаний составила 998,8–1015,3 (рис. 3, а). Средняя температура за июнь — 17 °С, колебания температуры в пределах 7,1–23,3 °С (рис. 3, б). Средняя скорость ветра — 7,9 м/с, амплитуда изменений 1–15 м/с (рис. 3, в). 26–30 июня циклонов в районе проливов не наблюдалось. 4 июня был замечен циклон над Норвежским морем, который частично задел Северное море. 5 июня этот циклон окончательно ушел в Норвежское море и перестал затрагивать Северное море, но над Великобританией начали зарождаться два новых циклона, которые к 6 июня исчезли.

На основании ранее изложенного было выявлено следующее:

1. Среднее давление за июнь выше среднего давления за май на 0,79 ГПа, амплитуда колебаний давления за июнь меньше, чем за май.
2. Средняя температура за июнь выше средней температуры за май на 3,2 °С, амплитуда изменения температуры за июнь также больше, чем за май.
3. Средняя скорость ветра за июнь меньше средней скорости ветра за май на 0,8 м/с, при этом амплитуды изменения скорости ветра за май также больше, чем за июнь.
4. Циклоны наблюдались в обоих месяцах.

Климатические условия Северного моря определяются его положением в умеренных широтах на восточной окраине Атлантического океана, взаимодействием двух основных центров действия атмосферы: Исландского минимума и Азорского максимума, теплого Северо-Атлантического течения, а также другими климатообразующими факторами. В соответствии с этим климату Северного моря присущи черты океанического климата умеренных широт с умеренной температурой воздуха, высокой влажностью, большой облачностью, обилием осадков.

Весной Исландский минимум ослабевает, отрог Сибирского антициклона начинает размываться. При этом Азорский максимум расширяется и усиливается. Такая барическая ситуация приводит к неустойчивости направлений и скорости ветров. Весна в Северном море прохладная. В открытом море температура воздуха обычно близка к 7 °С, но в северных районах она бывает на 1–3 °С ниже, а в южных и восточных на 3–5 °С выше. Весной часто наблюдается повышение или понижение температуры воздуха над морем.

Летом Исландский минимум в значительной мере ослаблен, отрог Сибирского антициклона размывает, Азорский максимум наиболее развит, смещен к северу и занимает обширное пространство. Такая крупномасштабная синоптическая обстановка приводит к преобладанию западных и юго-западных ветров в большинстве районов Северного моря. Скорость ветра обычно невелика и в летнее время ее среднемесячные значения находятся в пределах 2–5 м/с. Циклоническая деятельность над морем в этот сезон проявляется довольно слабо. Циклоны над морем наблюдаются реже, и они менее глубокие, чем зимой. Лето в Северном море умеренно теплое, наиболее теплые месяцы — июль–август. Наиболее высокая среднемесячная температура воздуха (17 °С) наблюдается в южных районах моря, самая низкая (12°) — в северных. Температура воздуха летом может значительно повышаться и достигать 23–25° в южных и восточных районах моря. Это связано с выносами теплого воздуха из субтропических районов. В северную и северо-западную часть моря проникает холодный воздух с севера, и тогда температура воздуха понижается на 3–5 °С. На основе результатов проведенных наблюдений можно выявить тенденции изменения направления ветра в зависимости от предыдущих климатических показаний и общего перемещения воздушных масс.

Преобладающие направления ветров и волнения в районах плавания. В Балтийском море 1–4 мая и 1–8 июля в центральной части Финского залива чаще всего дуют северо-восточные ветры. В районе острова Готланд преобладают западно-северо-западные, западные и северо-северо-восточные ветры, юго-восточнее и южнее острова Эланд — западные и западно-северо-западные ветры, в северной части острова Борнхольм — западно-северо-западные, западные и северо-западные, у побережья Германии — западные, западно-юго-западные и юго-западные. Эти тенденции можно проследить по условному изображению *розы ветров* относительно этих районов плавания (рис. 4).

Проливы Большой Бельт, Каттегат и Скагеррак судно пересекало 4–7 мая и 26–30 июня. В этот промежуток времени в проливе Большой Бельт чаще всего наблюдаются западные, западно-северо-западные, северо-западные и северо-северо-западные, в проливе Каттегат — юго-западные, западно-юго-западные, западные и западно-северо-западные, в проливе Скагеррак — западно-северо-западные и западно-юго-западные. Тенденции направления ветров в проливах графически отображены на условном изображении *розы ветров*, построенном относительно этих районов плавания (рис. 5).

Влияние на формирование ветров оказали циклоны, которые наблюдались в районах плавания в начале мая (около Швеции и Норвегии) и в конце июня, что и обосновывает направление

ветра на участках ниже него и западнее. Однако ближе к Килию в июне судно попало в зону действия антициклона, а также на изменение направления ветра оказали влияние близкое расположенные берега.

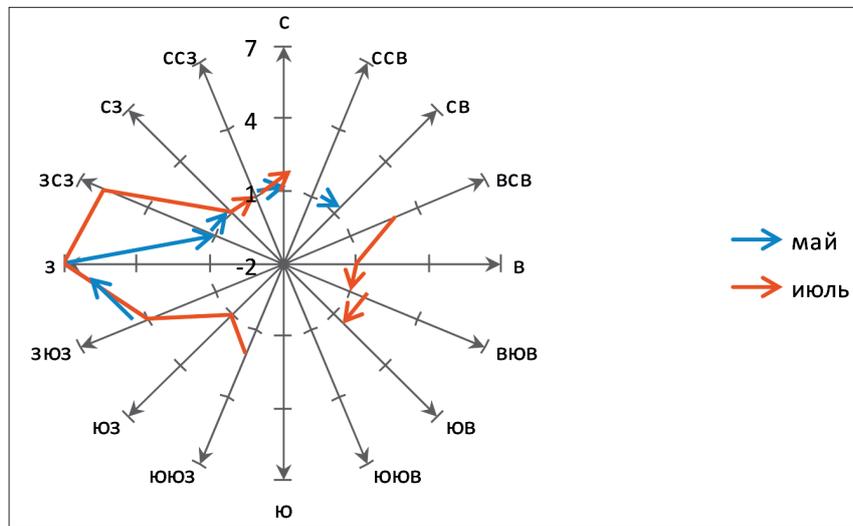


Рис. 4. Преобладающее направление ветра в Балтийском море

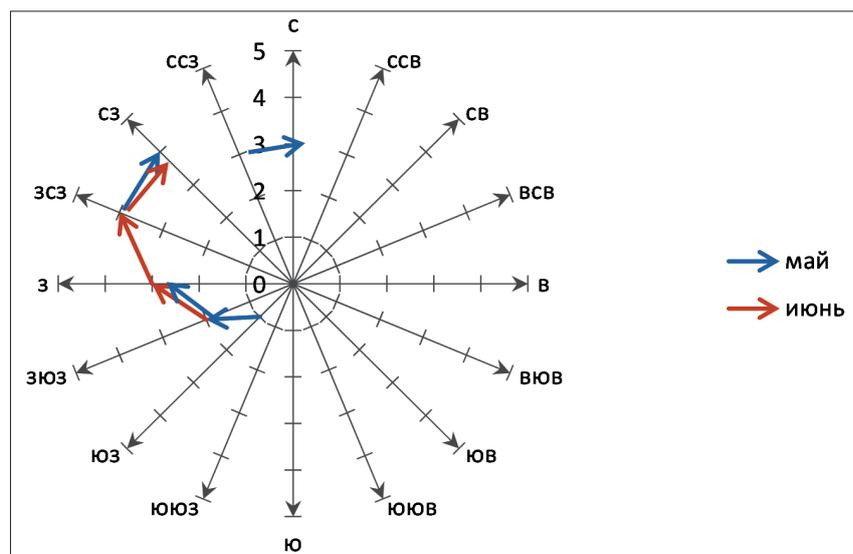


Рис. 5. Преобладающее направление ветра в проливах Большой Бельт, Каттегат, Скагеррак

Также маршрут УПС «Мир» проходил через Северное 7–31 мая и 1–25 июня. В восточной части моря в этот период чаще всего наблюдаются восточные ветры: юго-восточные, восточно-юго-восточные, юго-юго-восточные и восточные. Однако также имеют место южные, юго-юго-западные, западно-северо-западные и западно-юго-западные, в южной части моря — южные, юго-юго-западные, западно-юго-западные и юго-западные. Встречаются и восточные направления. В проливе Ла-Манш — юго-западные, западно-юго-западные, а также восточные ветры. Преобладающие направления ветра отображены на условной *розе ветров*, построенной для этих районов плавания (рис. 6).

Направление ветра в течение дня может изменяться несколько раз, причем на противоположные значения, в зависимости от скорости передвижения судна и, как следствие, от изменения его географического положения, а также барических тенденций. Чаще всего направление ветра

меняется во второй половине дня. Кроме того, каждый район имеет некоторые общие климатические характеристики.

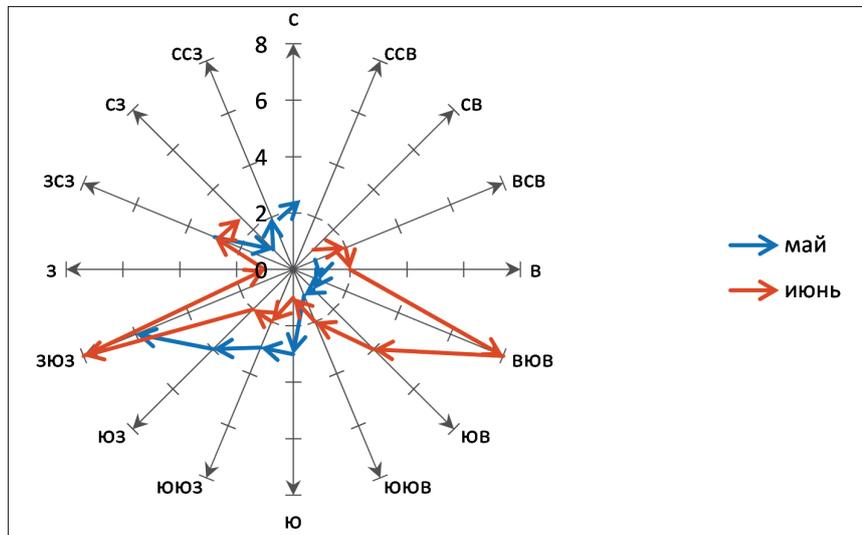


Рис. 6. Преобладающее направление ветра в Северном море

Волнения в Балтийском море в течение всего года преобладают высотой до 2 м. Так как море мелководное и внутриматериковое, высота волн редко достигает больших значений. 1–4 мая волнение в среднем составляло 1,2 м, максимальная высота волны была 3 м, минимальная — 0,1 м. Преобладающие направления волнения — юго-западные и северо-западные. Так, в районе о. Готланд и Эрланд наблюдались волнения южной и западной четвертей горизонта, а уже северо-восточнее о. Борнхольм появилось западно-северо-западное волнение. 1–8 июля в Балтийском море чаще наблюдалось западное направление волнения, особенно вблизи о. Готланд, а ближе к Финскому заливу все чаще наблюдалось волнение восточной четверти горизонта. В районе о. Кронштадт в течение двух дней наблюдался штиль. В остальном сохранились направления ветра, совпадающие с майскими: в районе о. Борнхольм — западно-северо-западное, вблизи о. Эланд наблюдались волнения южной и западной четверти горизонта. Высота волнения в среднем за месяц составила 0,8 м. Максимальный показатель — 3 м, минимальный — 0,1 м.

В проливах Большой Бельт, Каттегат и Скагеррак волнение стало больше уклоняться на север. 4–7 мая оно в среднем составило 0,8 м. Максимальная высота волны составила 3 м, минимальная — 0,1 м. 26–30 июня направление волнения сохранило показатели, зафиксированные в мае (это в основном направления западной четверти горизонта с большим уклоном в северном направлении). Высота волнения в среднем за месяц составила 0,4 м. Максимальный показатель — 1 м, минимальный — 0,1 м.

В Северном море волнение так же, как и в Балтийском, в среднем за год не превышает 2 м, но все-таки высокие показатели этих параметров встречаются чаще. Так, 7–31 мая несколько раз было зафиксировано максимальное значение высоты волны до 1,5 м, минимальное — 0,05 м. Также отмечалось несколько дней штиля, который в Северном море имеет повторяемость около 16 %.

Преобладающие направления волнения за май юго-западные, южной и западной четвертей горизонта, но также наблюдались северной и восточной. Например, в Западной части моря вблизи Восточных Фризских островов или в проливе Ла-Манш, ближе к нулевому меридиану и берегам Франции. В Южной части моря чаще всего наблюдалось северо-северо-западное направление волнения. 1–25 июня чаще всего встречались направления волнения восточной части горизонта. В Ла-Манше такие направления наблюдались и в мае, а в южной и западной части направление поменялось. Однако в южной части моря наблюдалось еще западно-юго-западное

направление волнения и северо-восточное. Также в Ла-Манше был один день, когда наблюдался штиль. Высота волнения в среднем за месяц составила 0,2 м. Максимальный показатель — 0,5 м, минимальный — 0,05 м.

Погода и преобладающие виды облачности в период рейса. Климатические характеристики определенных районов создают типичные воздушные массы, которые передвигаются, наслаиваются и совмещаясь с барическими тенденциями, создают определенные погодные условия [9]. Одной из показательных черт таких процессов может служить облачность, по которой можно составлять и кратковременный прогноз [10]–[11]. По разновидности облаков можно определить, какие барические образования и атмосферные фронты движутся в район плавания и на основании полученных данных сделать вывод о предполагаемом направлении и скорости ветра и осадках.

В Балтийском море 1–4 мая погода в основном наблюдалась пасмурная с облачностью больше пяти баллов (чаще всего 8 баллов, максимально 9 баллов). В этот период не было ни одного ясного дня. Облака нижнего яруса чаще всего встречались кучево-дождевые лысые, наряду с ними можно было наблюдать слоисто-кучевые кучевообразные башенковидного и вымеобразного вида. Среди облаков среднего яруса характерными были высокослоистые непросвечивающие туманообразные и волнистообразные, а также высококучевые волнистообразные просвечивающие (3 балла) и кучевообразные из кучевых, иногда с полосами падения осадков. На верхнем ярусе образовывались в основном перисто-волокнистые, не увеличивающиеся в объеме, перисто-слоистые, также нераспространяющиеся, и перисто-кучевые.

1–8 июля на Балтике преобладала пасмурная погода, облачность в среднем составляла около 6 баллов, максимальная облачность — 8 баллов. Однако прояснения встречались значительно чаще, чем в мае, но не сохранялись даже в течение одного дня. В основном на небесном покрове появлялись средние кучевые облака и мощные облака нижнего яруса, а также довольно часто можно было наблюдать кучево-дождевые лысые или волосатые облака, а также высококучевые кучевообразные башенковидные, чуть реже слоисто-дождевые, высококучевые волнистообразные просвечивающие и кучевообразные из кучевых, иногда со следами полос от выпадения осадков среднего яруса. Верхний ярус чаще всего описывали перисто-волокнистые, не заполняющие все небо, и перисто-кучевые, но порой их было не видно за более низкими плотными облаками.

В проливах Большой Бельт, Каттегат и Скагеррак в мае пасмурная погода составляла 55,5 %, ясная — 44,5 %. Преобладала облачность с максимальным значением 7 баллов. Облака нижнего яруса в основном наблюдались слоистые туманообразные, волнистообразные и разорванные слоистые, иногда переходящие в разорванно-дождевые. Наряду с ними появлялись кучевые плоские разорванные и кучевые средние и мощные. На среднем ярусе это были облака типа высококучевых, кучевообразных, башенковидных и хлопьевидных, а также волнистых чечевицеобразных и высокослоистых всех видов, на верхнем — перисто-волокнистых. В июне в этих проливах в 80 % случаев преобладала ясная погода с облачностью, редко превышающей 1 балл. Среди облаков нижнего яруса наблюдались слоистые туманообразные, волнистообразные и разорванные слоистые, иногда переходящие в разорванно-дождевые. Наряду с ними появлялись кучевые плоские разорванные и кучевые средние и мощные, а среднего и верхнего ярусов чаще отсутствовали. Однако иногда это были облака высококучевые волнистообразные просвечивающие, высококучевые кучевообразные башенковидные и хлопьевидные перисто-волокнистые, перисто-кучевые.

В Северном море в мае было три ясных дня, но в целом наблюдалось чередование пасмурной и ясной погоды. Были зафиксированы очень резкие перепады, за три часа облачность могла разойтись от девяти баллов до двух. Облаков нижнего и среднего ярусов чаще всего было значительно больше, чем верхнего, но все же они не закрывали все небо или были просвечивающие. Для акватории моря в этот период наблюдались характерные типы облаков: слоистые туманообразные, волнистообразные и разорванные слоистые, с переходом в разорванно-дождевые, а также кучево-дождевые лысые и слоисто-кучевые кучевообразные башенковидных и вымеобразных разновидностей. Во многих случаях небосклон довольно плотно был затянут облаками среднего яруса,

такими как высокослоистые непросвечивающие туманообразные и волнистообразные, высококучевые волнистообразные просвечивающие, от которых растягивались перисто-волокнисты, пересто-слоистые волокнистые, туманообразные и перисто-кучевые.

В июне над морем в 70 % господствовала пасмурная погода с облачностью выше 5 баллов с преобладанием 7-балльной затянутости неба. Максимальные значения достигали 9 баллов. Наряду с этим наблюдались дни, когда небо было фактически безоблачным. В основном наблюдались облака такие же, как и в мае, относящиеся к нижнему и среднему ярусам, но также довольно часто встречались высоко-кучевые кучевообразные хлопьевидные и башенковидные. Нередко наблюдались облака, образовавшиеся из кучевых нижнего яруса с полосами выпадения осадков. Слой ближе к тропосфере не всегда просматривался, но в основном наблюдались перисто-волокнистые и перисто-кучевые или перистые плотные облака.

Сопоставление приборных наблюдений и наблюдений по шкале Бофорта. На рис. 7 слоисто-кучевые просвечивающие (Sc trans) облака. Волны местами крупные, пенные, гребни занимают значительные участки, образуется водяная пыль. Высота волн 2,5–4,5 м. Ветер — 6 баллов по шкале Бофорта, скорость — около 10,8–13,8 м/с.

В соответствии с приборными измерениями в этот период наблюдался ветер со средней скоростью 16,5 м/с на высоте мачты (49,5 м). Если ввести поправку за высоту, то он приблизительно должен соответствовать скорости, определенной по шкале Бофорта.

На рис. 8 слоисто-кучевые просвечивающие (Sc trans) облака. Волны, хорошо развитые в длину, но не очень крупные, высотой в среднем 1,5–2,5 м. Гребни опрокидываются, образуя стекловидную пену. Ветер по шкале Бофорта — 5 балла со средней скоростью 8,0–10,7 м/с. По судовым гидрометеорологическим приборам скорость ветра соответствовала осредненному значению 15,3 м/с на высоте мачты.



Рис. 7. Балтийское море, 02.05.2019 г., 12:10 UTC
 (фото из личного архива)



Рис. 8. Балтийское море, 02.05.2019 г., 14:50 UTC
 (фото из личного архива)

На рис. 9 облака кучево-дождевые волосатые с грозовым валом (Cb cap.ars.). Волнение высотой 0,65–1,5 м. Во многих местах видны барашки, волны удлиненные. По шкале ветер в 4 балла со скоростью около 5,5–7,9 м/с. По судовыми приборам скорость ветра на уровне мачты составляла около 15,4 м/с. Характер ветра — порывистый. После этого в течение семи часов скорость ветра сохранялась в районе 14,5 м/с, также через семь часов после измерений (в 14:30) ветер был замерен анемометром, который показал значение 13 м/с направлением 25° по правому борту.

На рис. 10 облака кучевые средние (Cu med.), кучевые мощные (Cu cong.), высококучевые, образовавшиеся из кучевых (Ac cig.), перисто-слоистые волокнистые (Cs fib). Волны хорошо выраженные, но короткие, высотой в среднем 0,25–0,65 м. Гребни опрокидываются, образуя стекловидную пену. Ветер по шкале Бофорта 3 балла со средней скоростью 3,4–5,4 м/с. В это время по судовым приборам скорость ветра составляла 10 м/с, по анемометру — 6 м/с при направлении ветра 35° с правого борта.



Рис. 9. Балтийское море, 03.05.2019 г., 20:45 UTC
(фото из личного архива)



Рис. 10. Балтийское море, 04.05.2019 г., 14:30 UTC
(фото из личного архива)

На рис. 11 облака разорванно-кучевые (Cu fr.), кучевые с покрывалом (Cu pil.), перистые плотные (Ci sp.). По шкале Бофорта в наблюдаемый период ветер 2 балла со скоростью в среднем 1,6–3,3 м/с. Волны короткие, не выше 0,3 м, гребни не опрокидываются и кажутся стеклянными. В это время по судовым приборам скорость ветра составляла 10 м/с, по анемометру — 6 м/с при направлении ветра 35° с правого борта.



Рис. 11. Балтийское море, 04.05.2019 г., 14:50 UTC
(фото из личного архива)



Рис. 12. Северное море, 31.05.2019 г., 14:45 UTC
(фото из личного архива)

На рис. 12 облака слоисто-кучевые непросвечивающие (Sc op.). Водный покров покрыт легкой рябью. Ветер по шкале в 1 балл со скоростью, не превышающей 0,3–1,5 м/с. По судовым приборам скорость ветра на высоте мачты наблюдалась 1,6 м/с, что фактически совпадает с определением скорости по шкале Бофорта.



Рис. 13. Северное море, 17.06.2019 г., 15:40 UTC
(фото из личного архива)

На рис. 13 облака слоистые туманообразные (St neb.), не заполняют все небо. Наблюдается зеркально гладкая поверхность моря. По Бофорту — штиль, ветер 0–0,2 м/с.

По приборам скорость ветра определялась на уровне 3 м/с на высоте мачты. Ветер дул в левый борт под 60°. По анемометру скорость составляла 1,8 м/с.

Заключение (Conclusion)

По результатам проведенной научно-исследовательской работы во время рейса УПС «Мир» были выполнены сопутствующие гидрометеорологические наблюдения в соответствии с поставленными задачами, изучены гидрометеорологические условия плавания, и на основании выполненных работ составлен отчет.

По итогам анализа полученных данных были выявлены общие тенденции сдвигания весенне-летней сезонности и более раннего наступления некоторых погодных особенностей, характерных для более поздних периодов. Более того, во время мониторинга поступающей внешней метеорологической информации были выявлены расхождения, иногда значительные (например, там, где должна была наблюдаться ясная погода, отсутствовать осадки и повышаться давление, неожиданно происходили обратные явления). Были составлены графики направленности ветра по типу *розы ветров* относительно маршрута судна с привязкой к морям, т. е. не в одной определенной точке, а в нескольких. Также был проведен сравнительный анализ некоторых приборных данных с показателями, определенными по шкале Бофорта и выявлены расхождения в скорости ветра, характерной состоянию моря по шкале и по приборам. Возможно, это связано с пролеганием вблизи от береговых линий материков.

Для более полноценного описания гидрометеорологии бассейнов Балтийского и Северного морей с определением новых тенденций и закономерностей необходимо проведение дальнейших ежегодных исследований. При этом специалисты по морской метеорологии должны проходить достаточную подготовку, которой способствует прохождение практики в реальных условиях. Программа «Плавучий университет» соответствует этим целям в полной мере.

Студенты 2-го курса арктического факультета в период прохождения практики приобрели опыт ведения гидрометеорологических наблюдений приборным и визуальными способами, научились работать с источниками метеорологической информации, анализировать полученные данные, составлять отчеты о проведенных наблюдениях и полученных результатах, а также получили навыки коммуникации с экипажем и основы знаний по специализированной радиотехнике (факсимильным приемникам, антеннам приборов, РЛС) и навигационным системам (ECN1C, NAVTEX, GPS, ГЛОНАСС, компасы и др.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 52.04.316–92. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 9. Гидрометеорологические наблюдения на морских станциях. Ч. II. Гидрометеорологические наблюдения на судовых станциях, проводимые штатными наблюдателями. Кн. 1. Общие методические требования к организации и обеспечению гидрометеорологических и актинометрических наблюдений на судах. — СПб.: Гидрометеиздат, 1993. — 102 с.
2. РД 52.04.585–97. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 9. Гидрометеорологические наблюдения на морских станциях. Ч. III. Гидрометеорологические наблюдения, производимые штурманским составом на морских судах / Отв. ред. М. П. Иванов. — 3-е изд. — СПб.: Гидрометиздат, 1998. — 164 с.
3. Технический регламент (ВМО-№ 49). Сборник основных документов № 2. Т. I. Общие метеорологические стандарты и рекомендуемые практики. — Switzerland, Geneva: World Meteorological Organization, 2019. — 55 с.
4. Код для составления гидрометеорологических радиogramм на судах КН-01с. — Л.: Гидрометеиздат, 1981. — 55 с.
5. Международный атлас облаков / С. А. Кон. — ВМО: 2017.
6. Лоция Балтийского моря. Ч. II. Адм. № 1203. Южная часть моря. — СПб.: ГУНиО, 1992.
7. Лоция Балтийского моря. Ч. 3. Западная часть моря от Ботнического залива до мыса Торхамнсудде с островами Готланд и Эланд. — ЦКФ ВМФ: 1984.
8. Лоция Балтийского моря. Ч. V. Адм. № 1207. От мыса Торхамнсудде до пролива Зунд, проливы Зунд, Большой Бельт, Малый Бельт, Каттегат и озеро Венерн. Вып. 1. От мыса Торхамнсудде до пролива Зунд, проливы Зунд, Большой Бельт и Малый Бельт. — СПб.: ГУНиО, 1995.

9. Глухов В. Г. Гидрометеорологическое обеспечение мореплавания: учебник / В. Г. Глухов [и др.] — СПб.: Свое издательство, 2014. — 406 с.
10. Думанская И. О. Морские гидрологические прогнозы и оперативная океанология в Гидрометцентре России / И. О. Думанская [и др.] // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. — 2019. — № 4 (374). — С. 149–183.
11. Васильев А. А. О роли синоптика в технологии подготовки краткосрочных прогнозов погоды / А. А. Васильев, Р. М. Вильфанд // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. — 2019. — № 4 (374). — С. 144–148.

REFERENCES

1. RD 52.04.316-92. Nastavlenie gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam. Vypusk 9. Gidrometeorologicheskie nablyudeniya na morskikh stantsiyakh. Chast' II. Gidrometeorologicheskie nablyudeniya na sudovykh stantsiyakh, provodimye shtatnymi nablyudatelyami. Kniga 1. Obshchie metodicheskie trebovaniya k organizatsii i obespecheniyu gidrometeorologicheskikh i aktinometricheskikh nablyudenii na sudakh. SPb.: Gidrometeoizdat, 1993.
2. RD 52.04.585-97. Nastavlenie gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam. Vypusk 9. Gidrometeorologicheskie nablyudeniya na morskikh stantsiyakh. Chast' III. Gidrometeorologicheskie nablyudeniya, proizvodimye shturmanskim sostavom na morskikh sudakh. Edited by Ivanov. 3d ed. SPb.: Gidrometeorologicheskoe izdatel'stvo, 1998.
3. *Tekhnicheskii reglament (VMO-№ 49). Sbornik osnovnykh dokumentov № 2. Tom I – Obshchie meteorologicheskie standarty i rekomenduemye praktiki.* Switzerland, Geneva: World Meteorological Organization, 2019.
4. *Kod dlya sostavleniya gidrometeorologicheskikh radiogramm na sudakh KN-01s.* L.: Gidrometeoizdat, 1981.
5. *International Cloud Atlas.* S. A. Cohn. WMO: 2017.
6. *Lotsiya Baltiiskogo morya. Chast' II. Adm. № 1203. Yuzhnaya chast' morya.* SPb: GUN i O, 1992.
7. *Lotsiya Baltiiskogo morya. Ch. 3: Zapadnaya chast' morya ot Botnicheskogo zaliva do mysa Torkhamnsudde s ostrovami Gotland i Eland.* TsKF VMF: 1984.
8. *Lotsiya Baltiiskogo morya. Chast' V. Adm. № 1207. Ot mysa Torkhamnsudde do proliva Zund, prolivy Zund, Bol'shoi Bel't, Malyi Bel't, Kattegat i ozero Venern. Vypusk 1. Ot mysa Torkhamnsudde do proliva Zund, prolivy Zund, Bol'shoi Bel't i Malyi Bel't.* SPb.: GUN i O, 1995.
9. Glukhov, V. G., A. I. Gordienko, A. Yu. Sharonov, and V. A. Shmatkov. *Gidrometeorologicheskoe obespechenie moreplavaniya: uchebnik.* SPb: Svoe izdatel'stvo, 2014.
10. Dumanskaya, I. O., A. A. Zelenko, S. A. Myslenkov, E. S. Nesterov, S. K. Popov, Yu. D. Resnyansky, and B.S. Strukov. "Marine hydrological forecasts and operational oceanology in the hydrometeorological center of Russia." *Hydrometeorological Research and Forecasting* 4(374) (2019): 149–183.
11. Vasil'ev, A. A., and R. M. Vil'fand. "Forecaster's role in a technology for the preparation of short-range weather forecasts." *Hydrometeorological Research and Forecasting* 4(374) (2019): 144–148.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Смирнова Екатерина Станиславовна — студент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: gidrograph@mail.ru, kaf_gm@gumrf.ru

Семиделова Алина Олеговна — студент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: gidrograph@mail.ru, kaf_gm@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Smirnova, Ekaterina S. — Student
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: gidrograph@mail.ru, kaf_gm@gumrf.ru

Semidelova, Alina O. — Student
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: gidrograph@mail.ru, kaf_gm@gumrf.ru

Лузина Анастасия Валерьевна —
студент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: gidrograph@mail.ru, kaf_gm@gumrf.ru

Lusina, Anastasiy V. —
Student
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: gidrograph@mail.ru, kaf_gm@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 5 марта 2020 г.
Received: March 5, 2020.*

Научное периодическое издание

**Вестник Государственного университета морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

Том 12. № 5

2020 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать с оригинал-макета 30.10.20. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 18,25. Тираж 500 экз. Заказ № 338/20

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7